

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Řízení procesních laboratorních modelů pomocí
programovatelných automatů Simatic

Process laboratory models control using Simatic
programmable controllers

2015

Daniel Měkyna

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Měkyna**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy
Téma: **Řízení procesních laboratorních modelů pomocí programovatelných automatů Simatic**
Process Laboratory Models Control using Simatic Programmable Controllers

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technického řešení laboratorních modelů.
2. Popis komponent použitých v modelech.
3. Návrh a realizace řídicí aplikace pro programovatelný automat.
4. Návrh a realizace vizualizační aplikace pro operátorský panel a počítačové vizualizační prostředí.
5. Testování funkčnosti systému a zhodnocení výsledků.
6. Tvorba technické dokumentace k laboratorním modelům.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BERGER, Hans. *Automating with STEP 7 in STL and SCL*. 5th revised and enlarged edition. Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2009. ISBN 978-3-89578-341-8.
[2] BERGER, Hans. *Automating with SIMATIC*. 4th edition. Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2009. ISBN 978-3-89578-333-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řízení procesních laboratorních modelů pomocí programovatelných automatů Simatic, jsem vypracoval samostatně, pod vedením bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce, jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

7.5.2015

.....

V Ostravě dne



.....

Daniel Měkyna

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Jiřímu Koziorkovi, Ph.D za mnoho přínosných konzultací a rad, které mi během tvorby této práce poskytl. Také bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Štěpánu Ožanovi, Ph.D za rady týkající se teorie řízení.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá realizací řídicích algoritmů pro procesní laboratorní modely firmy Stroza pomocí programovatelných automatů Simatic. V první části práce je provedena analýza technického řešení laboratorních modelů a popis jednotlivých komponent. Dále je uvedena analýza možností řízení jednotlivých modelů. V souvislosti s tím je v druhé části práce uvedena identifikace reakčního a mixovacího pracoviště a je popsán proces navržení regulátorů. V práci jsou také popsány jednotlivé řídicí algoritmy pro každou z úloh s ohledem na jejich vznik a význam. Pro všechny úlohy byla vytvořena vizualizace zajišťující plnohodnotnou obsluhu všech procesů. Řídicí software byl vytvořen pomocí TIA Portal a vizualizace pomocí Wonderware InTouch.

KLÍČOVÁ SLOVA

PID regulátor, PLC, HMI, Simatic S7 – 1500, Regulace teploty, Regulace na konstantní průtok

ABSTRACT

The thesis deals with the implementation of control algorithms for Stroza process laboratory models with Simatic programmable controllers. In first part, this work presents an analysis of technical solution of laboratory models and description of each component. There is also analysis of control options of these models. In this context, the second part of this work shows identification of reactionary and mixing laboratory models and describes the process of designing the controllers. There is also description for each control algorithm with regard to their creation and importance. For all those models was created visualisation for the full operation of all processes. Control software was created in TIA Portal and visualisation in Wonderware InTouch.

KEYWORDS

PID Controller, PLC, HMI, Simatic S7 – 1500, Temperature control, Constant flow control

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	Popis procesních úloh.....	2
2.1	Procesní úloha – pracoviště reakční	2
2.1.1	Základní popis	2
2.1.2	Popis procesní části	3
2.1.3	Seznam a analýza řízených prvků soustavy	4
2.2	Procesní úloha – pracoviště mixovací.....	5
2.2.1	Základní popis	5
2.2.2	Popis procesní části	6
2.2.3	Seznam a analýza řízených prvků soustavy	7
2.3	Procesní úloha – pracoviště plnicí.....	8
2.3.1	Základní popis	8
2.3.2	Popis procesní části	9
2.3.3	Seznam a analýza řízených prvků soustavy	10
3	Programovatelné automaty v řízení.....	11
3.1	Princip funkce PLC	11
3.2	Typy řízených objektů.....	13
3.3	PLC Simatic S7-1500.....	14
3.3.1	Prvky PLC Simatic S7-1500	15
3.3.2	Programovací jazyky PLC Simatic S7-1500.....	17
4	Funkční analýza.....	21
4.1	Funkční analýza reakčního pracoviště	21
4.2	Funkční analýza mixovacího pracoviště	23
4.3	Funkční analýza plnicího pracoviště	23
4.4	Shrnutí poznatků o řízení	25
4.4.1	Poznatky o řízení reakčního pracoviště	25
4.4.2	Poznatky o řízení mixovacího pracoviště.....	25
4.4.3	Poznatky o řízení plnicího pracoviště	26
5	Matematicko-fyzikální analýza a identifikace	27

5.1	Identifikace reakčního pracoviště.....	27
5.1.1	Návrh regulátoru pro reakční pracoviště	31
5.2	Identifikace mixovacího pracoviště.....	32
5.2.1	Návrh regulátoru pro mixovací pracoviště	35
6	Návrh algoritmů řízení v TIA Portal	38
6.1	HW konfigurace a seznam I/O signálů.....	38
6.1.1	HW konfigurace PLC.....	38
6.1.2	Seznam I/O signálů reakčního pracoviště	38
6.1.3	Seznam I/O signálů mixovacího pracoviště	39
6.1.4	Seznam I/O signálů plnicího pracoviště.....	40
6.2	Řídicí software reakčního pracoviště	40
6.2.1	Tabulka použitých symbolů v PLC	42
6.2.2	Schéma regulace a význam PWM.....	42
6.2.3	Měření regulace teploty.....	45
6.3	Vizualizace reakčního pracoviště.....	47
6.4	Řídicí software plnicího pracoviště.....	49
6.4.1	Tabulka použitých symbolů v PLC	50
6.4.2	Měření průběhu plnění kádinek.....	51
6.5	Vizualizace plnicího pracoviště.....	52
6.6	Řídicí software mixovacího pracoviště	53
6.6.1	Tabulka použitých symbolů v PLC	55
6.6.2	Schéma regulace.....	56
6.6.3	Měření regulace průtoku	56
6.7	Vizualizace mixovacího pracoviště.....	59
7	Závěr	61
	Literatura.....	62
	Seznam příloh.....	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Procesní úloha – pracoviště reakční	2
Obrázek 2.2: Procesní část reakčního pracoviště	3
Obrázek 2.3: Procesní úloha – pracoviště mixovací	5
Obrázek 2.4: Procesní část mixovacího pracoviště	6
Obrázek 2.5: Procesní úloha – pracoviště mixovací	8
Obrázek 2.6: Procesní část plnicího pracoviště	9
Obrázek 3.1: Cyklické provádění programu v PLC Simatic S7-1500	12
Obrázek 3.2: Dělení řízených objektů	14
Obrázek 3.3: Architektura automatizačního systému s PLC S7-1500	15
Obrázek 3.4: Prvky PLC S7-1500	16
Obrázek 3.5: Příklad realizace logických funkcí v jazyce LAD	17
Obrázek 3.6: Příklad realizace logické funkce AND v jazyce FBD	18
Obrázek 3.7: Příklad realizace FIFO registru v jazyce SCL	19
Obrázek 3.8: Příklad realizace logických funkcí v jazyce STL	19
Obrázek 3.9: Součásti a vlastnosti řízení pomocí jazyku S7-GGRAPH	20
Obrázek 4.1: Vývojový diagram řízení reakčního pracoviště	22
Obrázek 4.2: Vývojový diagram mixovacího pracoviště	23
Obrázek 4.3: Vývojový diagram plnicího pracoviště	24
Obrázek 5.1: Přechodová charakteristika systému se 100% PWM bez mixéru	28
Obrázek 5.2: Přechodová charakteristika systému se 100% PWM bez mixéru	28
Obrázek 5.3: Přechodová charakteristika systému se 100% PWM s mixérem	29
Obrázek 5.4: Přechodová charakteristika systému se 35% PWM s mixérem	29
Obrázek 5.5: Statická charakteristika proporcionálního ventilu mixovacího pracoviště	32
Obrázek 5.6: Nelinearita systému za předpokladu volného odtoku z nádrže mixovacího pracoviště ..	33
Obrázek 5.7: Přechodová charakteristika mixovacího pracoviště v delším časovém horizontu	34
Obrázek 5.8: Přechodová charakteristika mixovacího pracoviště	35
Obrázek 5.9: Model mixovacího pracoviště se zařazením Smithova prediktoru	36
Obrázek 5.10: Simulace regulace mixovacího pracoviště v Matlabu	37
Obrázek 6.1: Použití spojitého regulátoru a PWM bloku v TIA Portal	41
Obrázek 6.2: Schéma regulace reakčního pracoviště	43
Obrázek 6.3: Blokové schéma spojitého regulátoru CONT_C	44
Obrázek 6.4: Princip pulzně-šířkové modulace užitý při regulaci	45
Obrázek 6.5: Regulace teploty reakčního pracoviště – PI regulátor	46
Obrázek 6.6: Regulace teploty reakčního pracoviště – pouze P regulátor	46
Obrázek 6.7: Okno procesní úlohy reakčního pracoviště	47
Obrázek 6.8: Okno pro nastavení PID regulátoru reakčního pracoviště	48
Obrázek 6.9: Okno pro zobrazení trendů reakčního pracoviště	48
Obrázek 6.10: Použití dvou funkčních bloků při řízení plnicího pracoviště	50

Obrázek 6.11: Průběh plnění kádinek plnicího pracoviště.....	52
Obrázek 6.12: Okno procesní úlohy plnicího pracoviště	53
Obrázek 6.13: Princip snímání průtoku z hlediska periody pulsů průtokoměru	54
Obrázek 6.14: Funkční blok pro snímání průtoku umístěný v OB40.....	54
Obrázek 6.15: Použití spojitého regulátoru PID_Compact v TIA Portal.....	55
Obrázek 6.16: Schéma regulace mixovacího pracoviště.....	56
Obrázek 6.17: Regulace průtoku mixovacího pracoviště se zapnutým čerpadlem	57
Obrázek 6.18: Regulace průtoku mixovacího pracoviště.....	58
Obrázek 6.19: Regulace průtoku mixovacího pracoviště včetně otevírání ventilu	59
Obrázek 6.20: Okno procesní úlohy mixovacího pracoviště.....	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Seznam řízených prvků reakčního pracoviště.....	4
Tabulka 2.2: Seznam řízených prvků mixovacího pracoviště.....	7
Tabulka 2.3: Seznam řízených prvků plnicího pracoviště	10
Tabulka 6.1: Hardwarová konfigurace PLC.....	38
Tabulka 6.2: Seznam I/O signálů reakčního pracoviště.....	38
Tabulka 6.3: Seznam I/O signálů mixovacího pracoviště.....	39
Tabulka 6.4: Seznam I/O signálů plnicího pracoviště.....	40
Tabulka 6.5: Tabulka tagů a symbolů použitých v rámci programu reakčního pracoviště.....	42
Tabulka 6.6: Tabulka tagů a symbolů použitých v rámci programu plnicího pracoviště	51
Tabulka 6.7: Tabulka tagů a symbolů použitých v rámci programu mixovacího pracoviště.....	56

1 ÚVOD

Neodmyslitelnou částí automatizace je už od nepaměti ovládat objekty a technologické procesy, a co více, nejenom je ovládat, ale také řídit. Vniká tedy potřeba zavést pojem zpětnovazebního řízení, které můžeme vnímat jako „slepeckou hůl“ daného systému, protože předává informace z výstupu na vstup a tedy umožňuje efektivní řízení daného objektu či procesu, kde je zpětnovazebního řízení užito. To v praxi značí efektivní implementaci algoritmů PID regulace, což je primární snahou této práce.

Pro implementaci těchto řídicích algoritmů do praxe, bude v této práci použito programovatelného automatu Simatic společnosti Siemens, konkrétně produktové řady S7-1500. Bude popsáno, jak jsou tyto automaty vybaveny na možnosti řízení a regulace, jaké bloky obsahují a jak je realizována PID regulace, popřípadě další typy regulací, které budou použity v návaznosti na dané typy úloh. Řídicí software bude realizován pomocí vývojového prostředí TIA Portal V12. Pokud hovoříme o vytvoření řídicího software, pak máme na mysli i vytvoření vizualizace pro všechny procesy. Tato vizualizace bude tvořena v prostředí Wonderware InTouch.

Nedílnou částí této práce je taktéž funkční analýza procesních úloh, na kterých bude řízení probíhat. Jedná se o pracoviště Reakční, Mixovací a Plnicí firmy Stroza, které budou řízeny podle potřeb specifikovaných funkční analýzou. Analýza bude spočívat mimo jiné také v rozboru technického řešení všech modelů, tedy jakými prvky jsou všechny tyto soustavy tvořeny a jaké možnosti řízení z toho plynou.

Integrální součástí práce je také matematická analýza a identifikace systémů tvořící řízené úlohy tak, abychom byli schopni navrhnout příslušný regulátor, který by odpovídal požadavkům řízení stanovených funkční analýzou. V návaznosti na to je vhodné poznamenat, že část matematické analýzy a identifikace se bude týkat pouze pracoviště reakčního a mixovacího. V případě plnicího pracoviště budou uvedeny důvody, proč nemá smysl tento model matematicky popisovat a jaké řízení je v tomto případě vhodné.

Cílem této práce je tedy vytvořit celistvé pojetí řízení a regulace procesních úloh pomocí programovatelných automatů Simatic S7-1500, tak aby implementované algoritmy splňovaly požadavky moderní automatizace a odpovídaly nejnovějším poznatkům z teorie řízení.

2 Popis procesních úloh

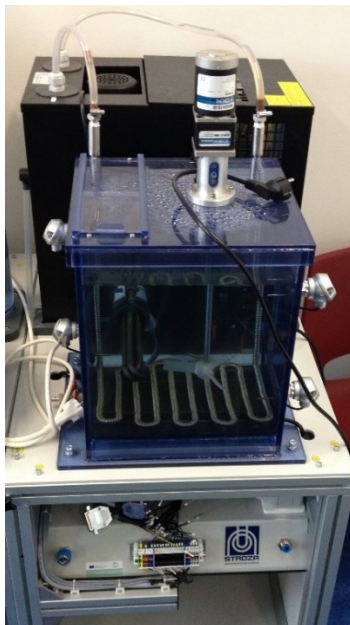
Úkolem této práce, jak již bylo zmíněno, bude řídit tři procesní úlohy pomocí programovatelného automatu Simatic S7-1500. Aby však bylo možné zpracovat funkční analýzu, je potřeba úlohy důkladně popsat aby bylo zřejmé, co chceme řídit a jak. Tato kapitola tedy uvede ve známost základní parametry řízených soustav a následně popíše komponenty, kterými jsou tvořeny, což nám poskytne logický základ pro vytváření řídicích algoritmů.

2.1 Procesní úloha – pracoviště reakční

2.1.1 Základní popis

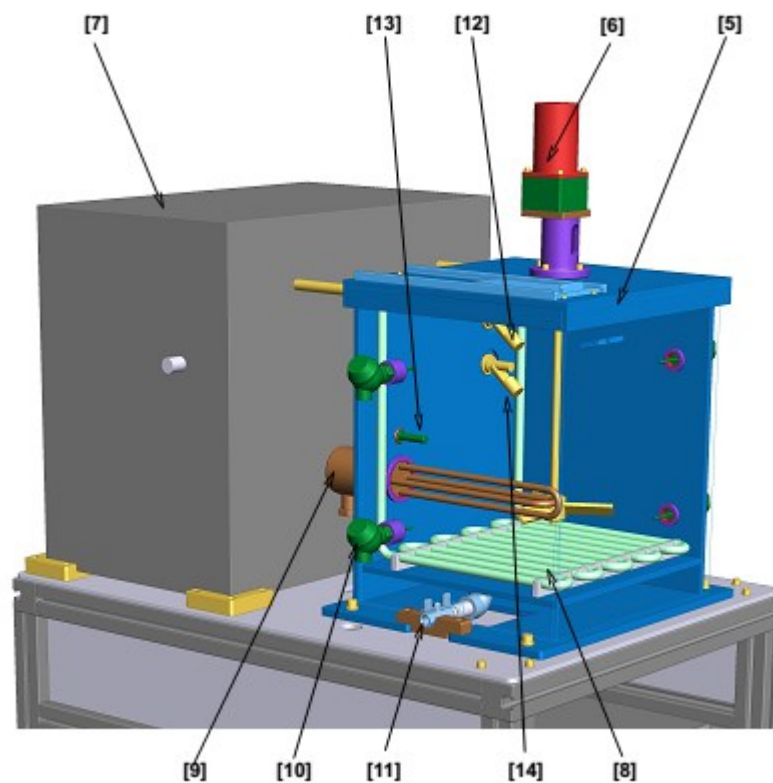
Hlavní částí této procesní úlohy je zásobník s vodou, ve kterém je možno simulovat ohřev, ochlazení a mixování kapaliny. Ohřívání zajišťuje topné těleso a chlazení je řešeno pomocí spirály v zásobníku a externího chladicího zařízení. Mixování je pak zajištěno pomocí vrtule na elektromotoru. Teplota kapaliny v zásobníku se dá měřit pomocí čtyř teplotních čidel umístěných na různých místech. Minimální hladinu pro správnou funkci úlohy zajišťuje dvojice plovákových čidel. Tato procesní úloha je určena na práci s vodou.

Poháněcí médium je tlakový vzduch, konkrétně filtrovaný stlačený vzduch nemazaný. Hlavní tlak je stanoven na 4-5 barů. Vstupem a výstupem jsou rychlospojky společnosti FESTO. Řídicí systém lze připojit pomocí připojovací svorkovnice.



Obrázek 2.1: Procesní úloha – pracoviště reakční

2.1.2 Popis procesní části



Obrázek 2.2: Procesní část reakčního pracoviště [1]

- [5] Nádob s ručně doplňovanou kapalinou po vyznačenou rysku.
- [6] Elektromotor s převodovkou a mixovací vrtulí.
- [7] Externí chladicí zařízení.
- [8] Chladicí spirála.
- [9] Topné těleso.
- [10] 4x teplotní čidlo.
- [11] Vypouštěcí ruční ventil.
- [12] Plovákové čidlo minimální hladiny.
- [13] Bezpečnostní termostat.
- [14] Bezpečnostní plovákové čidlo.

2.1.3 Seznam a analýza řízených prvků soustavy

Při řízení reakčního pracoviště bude užito prvků, které sumarizuje tabulka 2.1. Celá soustava obsahuje další prvky uvedené v [1], nicméně níže uvedená tabulka ukazuje pouze řiditelné prvky, které budou implementovány v řídicích algoritmech.

Prvek č.	Název	Označení	Výrobce	Počet
1	DC motor	6Gbd12.5mh	DKM	1
2	Topné těleso	TYP 4206 – 420 696 220	Backer - Elektro	1
3	Chladicí zařízení AS-80 atyp	VCH01956	Miloš Lindr	1
4	Teplotní senzor PTK 160-50	PTK 160, PT100/3850	Sensit	4

Tabulka 2.1: Seznam řízených prvků reakčního pracoviště

Stejnoseměrný motor, který je ovládán diskrétně (zapnuto/vypnuto), je určen ke spínání vrtule uvnitř nádoby. Hlavní funkci této vrtule je stabilizace teploty v nádobě, jelikož při ohřevu dochází k nerovnoměrnému rozložení tepla v nádobě. Náhledu na případné využití v regulaci je možno specifikovat více, a proto je tato otázka rozebírána podrobněji v kapitolách funkční analýzy.

Topné těleso, určené na ohřev kapaliny v nádobě, je ovládáno diskrétně, tedy zapnuto/vypnuto. Napájení je realizováno pomocí 230 V, přičemž příkon je 2000 W. Důležitá informace z hlediska řízení je obsažena v diskrétním ovládání tělesa, kdy je znemožněna plynulá regulace teploty tělesa což nahrává myšlence PWM regulace, kterou můžeme vnímat jako spojitou PID regulaci. Více o této metodě řízení je pojednáno dále v kapitolách funkční analýzy.

Chladicí zařízení je taktéž ovládáno diskrétně, nicméně je zde možnost nastavit intenzitu chlazení v rozmezí 1-7 manuálně, přímo na samotném zařízení. Experimentálně bylo prokázáno, že maximální intenzita chlazení vykazuje daleko větší efektivitu než zahřívání pomocí topného tělesa. Z hlediska regulace by nemělo valný smysl topit a zároveň kapalinu ochlazovat. Úloha chlazení bude proto dále zkoumána v kapitolách funkční analýzy.

Posledními důležitými částmi soustavy jsou teplotní snímače, které pracují jako analogové snímače s teplotním rozsahem -30 až 100 °C, což odpovídá výstupnímu signálu 4 až 20 mA. Snímač nebo snímače potom budou plnit úlohu zpětné vazby v regulačním obvodu, dle potřeb specifikovaných funkční analýzou.

2.2 Procesní úloha – pracoviště mixovací

2.2.1 Základní popis

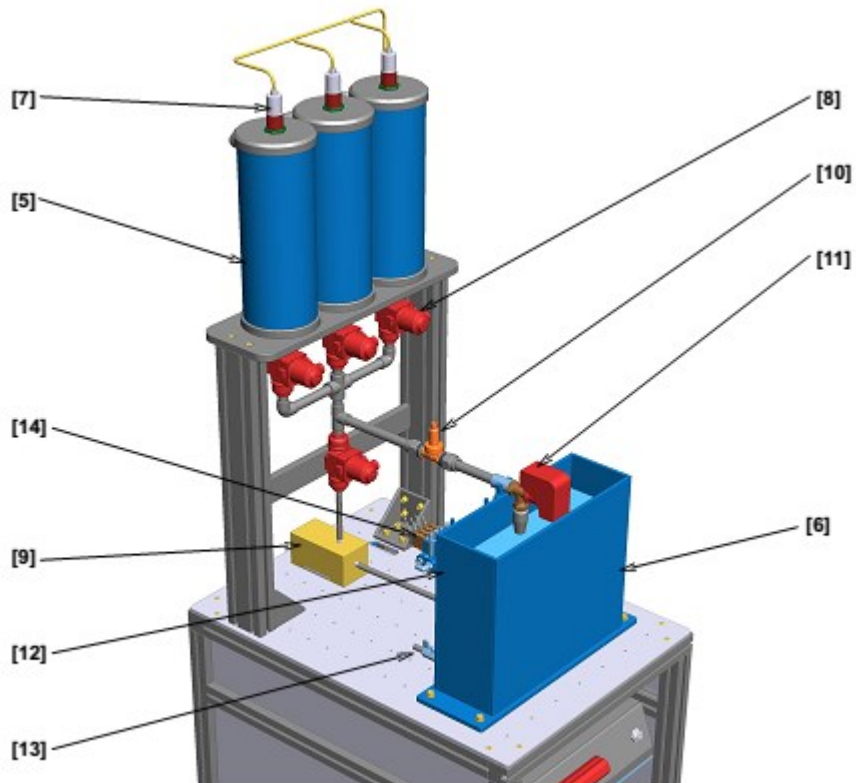
Hlavní část této úlohy tvoří trojice zásobníků s kapalinou, kdy pomocí pneumaticky ovládaných membránových ventilů a průtokoměrů lze do spodní mixovací nádrže dávkovat přesný poměr kapaliny. Naopak z mixovací nádrže lze kapalinu přečerpat zpět do nádrže za pomoci čerpadla. Výšku hladiny v jednotlivých zásobnících lze měřit pomocí ultrazvukových snímačů. Maximální výšku v mixovací nádrži hlídá plovákové čidlo. Tato procesní úloha je určena na práci s vodou.

Poháněcí médium je opět tlakový vzduch, konkrétně filtrovaný stlačený vzduch nemazaný. Hlavní tlak je stanoven na 4 - 5 barů. Vstupem a výstupem jsou rychlospojky společnosti FESTO.



Obrázek 2.3: Procesní úloha – pracoviště mixovací

2.2.2 Popis procesní části



Obrázek 2.4: Procesní část mixovacího pracoviště [2]

- [5] 3x zásobník s kapalinou.
- [6] Mixovací nádrž.
- [7] 3x ultrazvukový snímač pro měření výšky hladiny.
- [8] 4x membránový ventil ovládaný pneumaticky.
- [9] Odstředivé čerpadlo 230V.
- [10] Průtokoměr impulsní.
- [11] Proporcionální ventil ovládaný elektricky 0-10V.
- [12] Plovákové čidlo.
- [13] Ruční ventil s hadicovým adaptérem pro vypuštění kapaliny z pracoviště.
- [14] Blok s elektromagnetickými ventily.

2.2.3 Seznam a analýza řízených prvků soustavy

Níže uvedená tabulka 2.2 uvádí seznam komponent, které budou užity při řízení mixovacího pracoviště. Kompletní seznam komponent je uveden v [2].

Prvek č.	Název	Označení	Výrobce	Počet
1	Pneumatický membránový ventil	610 15D 7 1 4 1 1/N	Gemü	4
2	Proporcionální ventil	VEN 215	Siemens	1
3	Průtokoměr	DPL-1V15-G4 F300	Kobold	1
4	Ultrazvukový snímač	UM30-212118	Sick	3
5	Čerpadlo 1048	10W 600L/h	Eheim	1
6	Plovák	RSF74Y100RM	Cynergy3	1

Tabulka 2.2: Seznam řízených prvků mixovacího pracoviště

Pneumatické membránové ventily jsou diskrétně řízené prvky, pomocí kterých se utváří trasa, kterou se ubírá kapalina z nádob. Jelikož mají dva stavy – otevřeno a zavřeno – nelze regulovat průtok plynule.

Proporcionální ventil je elektricky ovládaný analogový ventil, který umožňuje plynulou regulaci odtoku vody do mixovací nádrže. Je řízen napětově 0 – 10 V, kdy 10 V značí maximální otevření ventilu. Spolu s průtokoměrem tvoří hlavní dynamickou část celé regulační soustavy. Průtokoměr má jeden vstup, jenž vrací frekvenci 0 - 505 Hz. Tato frekvence odpovídá reálnému průtoku 0 – 6 l/min. Při regulaci konstantního průtoku by pak mohl být průtokoměr vnímán jako zpětná vazba systému. Pokud by byla úloha realizována jinak, byl by průtokoměr hlavní informací o přítoku kapaliny do nádrže. Tyto náhledy budou později rozebírány v kapitolách funkční analýzy.

Ultrazvukové snímače hladiny jsou analogové snímače informující o výšce hladiny v zásobnících s kapalinou. Všechny tyto snímače mají napětové rozsahy 0 – 10V, přičemž minimální hladina odpovídá 10 V a maximální hladina 0 V. Všechny ultrazvukové snímače mají taktéž kromě analogového výstupu taky výstup digitální, který detekuje 100% hladiny v zásobnících.

Čerpadlo je ovládáno diskrétně a je užito k přečerpání kapaliny z mixovací nádrže dle zvolené trasy pomocí pneumatických ventilů. Důležitou vlastností čerpadla je možnost přečerpávat kapalinu z mixovací nádrže zpět do zásobníků v průběhu celé regulace a tím například udržovat hladiny v zásobnících na stejné hodnotě. Rozbor tohoto problému bude uveden později, při stanovení funkční analýzy soustavy.

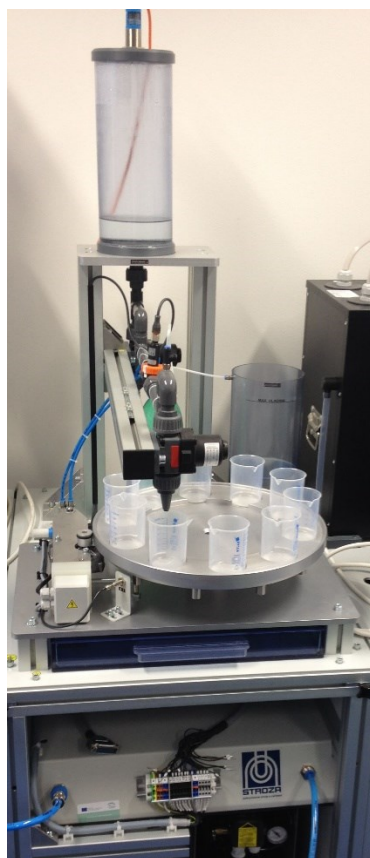
Plovákové čidlo je opět diskrétní prvek, který slouží pro kontrolu maximálního stavu hladiny v nádrži. Pokud bude aktivován a hladina dosáhne maxima, přítok do nádrže bude přerušen.

2.3 Procesní úloha – pracoviště plnicí

2.3.1 Základní popis

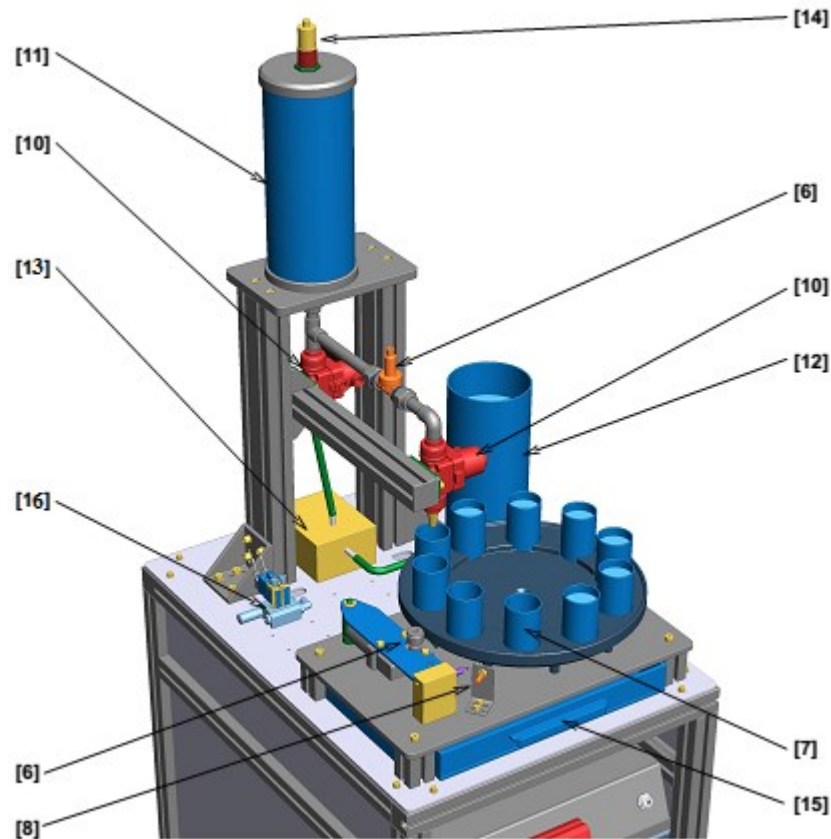
Hlavní částí této procesní úlohy je karusel, na kterém jsou umístěny prázdné nádobky, které se plní dle předem nastaveného objemu. Na plnicí pozici jsou nádobky dopravovány pomocí elektromotoru přes třecí převod. Kapalina se dávkuje z horního zásobníku za pomoci membránového ventilu a impulsního průtokoměru. Výška hladiny v horním zásobníku je měřitelná ultrazvukovým snímačem, ten se dále doplňuje z plnicího zásobníku pomocí odstředivého čerpadla. Možné úkapy tekutiny z dávkovací hlavy jsou svedeny do zachytné vany pod karuselem. Tato procesní úloha je určena na práci s vodou.

System je řízen pneumaticky, tedy poháněcí médium je tlakový vzduch, konkrétně filtrovaný stlačený vzduch nemazaný. Hlavní tlak je stanoven na 4 - 5 barů. Vstupem a výstupem jsou rychlospojky společnosti FESTO.



Obrázek 2.5: Procesní úloha – pracoviště mixovací

2.3.2 Popis procesní části



Obrázek 2.6: Procesní část plnicího pracoviště [3]

- [6] Karusel poháněný motorem přes třecí převod.
- [7] Nádobky k naplnění.
- [8] Indukční snímač pro nastavení polohy zastavení karuselu.
- [9] Průtokoměr impulsní.
- [10] 2x membránový ventil ovládaný pneumaticky.
- [11] Horní zásobník s dávkovanou kapalinou.
- [12] Plnicí zásobník pro naplnění horního zásobníku.
- [13] Odstředivé čerpadlo 230V.
- [14] Ultrazvukový snímač pro měření výšky hladiny.
- [15] Záchytná vana úkapů z karuselu.
- [16] Blok s elektromagnetickými ventily.

2.3.3 Seznam a analýza řízených prvků soustavy

Níže uvedená tabulka 2.3 uvádí seznam komponent, které budou užity při řízení plnicího pracoviště. Kompletní seznam komponent je uveden v [2].

Prvek č.	Název	Označení	Výrobce	Počet
1	Ultrazvukový snímač	UM30-212118	Sick	1
2	Pneumatický membránový ventil	610 15D 7 1 4 1 1/N	Gemü	2
3	Průtokoměr	DPL-1V15-G4 F300	Kobold	1
4	Čerpadlo 1048	10W 600L/h	Eheim	1
5	Indukční snímač	IME08-02BPSZW2S	Sick	1
6	Převodový motor DC DO316	198511	Doga	1

Tabulka 2.3: Seznam řízených prvků plnicího pracoviště

Ultrazvukový snímač slouží k monitorování hladiny v zásobníku s dávkovanou kapalinou. Má celkem dva vstupy – jeden diskretní a druhý analogový. Diskretní vstup poté slouží k detekci maximální hladiny v zásobníku. Analogový vstup vrací hodnotu 0 - 10 V dle výšky hladiny v zásobníku. Hodnota 0 V značí 100% výšky hladiny v zásobníku a hodnota 10 V prázdnou nádobu. Ultrazvukový snímač má také jeden diskretní výstup, který slouží k inicializaci displeje ultrazvuku.

Pneumatické membránové ventily jsou diskretními prvky, přičemž první z ventilů slouží k plnění zásobníku s dávkovanou kapalinou a druhý pro plnění nádob na karuselu. Množství kapaliny, která má být dávkována do nádobek je měřeno průtokoměrem, který má jeden vstup, jenž vrací frekvenci 0 - 505 Hz. Tato frekvence odpovídá reálnému průtoku 0 – 6 l/min. S tím úzce souvisí objem nádob na karuselu, kdy každá z deseti nádob má objem 150 ml.

Indukční snímač slouží jako snímač polohy karuselu. To značí, že se jedná o diskretní prvek, který pokud je karusel ve správné poloze, vykazuje hodnotu logické 1. V návaznosti na náběžnou hranu tohoto signálu se zastaví motor pohánějící karusel.

Čerpadlo a převodový motor jsou diskretní prvky, kdy čerpadlo slouží k doplňování kapaliny do zásobníku s kapalinou a převodový motor k pohonu karuselu s nádobami. Důležitou vlastností čerpadla je možnost přečerpávat kapalinu se zásobníku do plnicí nádrže v průběhu procesu plnění nádobek.

Z výše uvedeného je patrné, že jediným analogovým prvkem je ultrazvuk v zásobníku s vodou, což má výrazné dopady na řízení této úlohy z hlediska spojitě regulace. Jinými slovy není zde co regulovat a je tedy potřeba tuto úlohu chápat jinak, než jako regulační. Dále je tento problém řešen v kapitolách funkční analýzy.

3 Programovatelné automaty v řízení

Primární myšlenkou vycházející z automatizace bylo redefinovat vztah člověka k samotným automatizovaným procesům, tím se rozumí co nejvíce zefektivnit a minimalizovat stereotypní fyzickou práci, kterou musel člověk vykonávat. S tím jak rostly nároky na řízení procesů, bylo potřeba zajistit robustní řízení všech kritických procesů, se kterými se lze v průmyslu setkat.

Řešení tohoto problému se začalo rýsovat s příchodem mikropočítačů a rozvojem číslicové techniky. Předchůdci programovatelných automatů byly v této oblasti reléové řídicí systémy, které se používaly pro řízení technologických procesů. Pro samotné řízení se používala reléová logika a pro vizualizaci se používaly signální lampy a klasické měřicí přístroje. Nevýhodou nicméně bylo složení systému z elektromechanických prvků a také absence paměti v tom smyslu, že při poruše některého relé se ztratila celková informace, kterou obvod nesl.

Nahrazení reléových systémů přišlo s příchodem programovatelných automatů, které přinesly do řídicího systému pružnost, modifikovatelnost a rozšiřitelnost ale také tolik potřebnou rychlou diagnostiku poruchy vstupních a výstupních signálů. Celkově lze označit tento vývoj jako dramatický v oblasti produktivity a efektivity řízení procesů. [4]

Co se týče vizualizace tak ta přešla od signálních lamp a měřících přístrojů do sofistikovanější podoby uživatelských rozhraní SCADA a HMI.

3.1 Princip funkce PLC

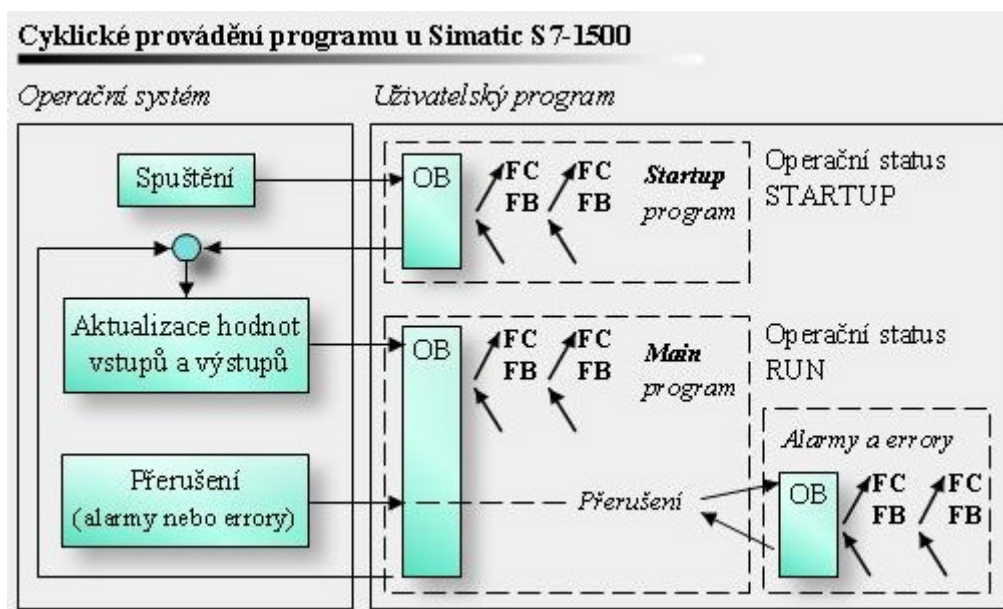
Základním principem běhu PLC je cyklické provádění řídicího programu. To je založeno na čtení vstupů, zpracování programu, vysílání výstupů popřípadě na dalších činnostech jako je komunikace či aktualizace systémových proměnných.

Program v CPU obsahuje jak operační systém, tak samotný program (user program), který poskytuje automatu inteligenci pro realizaci řízení. Operační systém řeší například režimy start-stop automatu, volání uživatelského programu nebo případné chyby a otázky komunikace. Uživatelský program je tvořen uživatelem s cílem realizace konkrétního řešení řízení.

Na obrázku 3.1 můžeme vidět konkrétně princip funkce PLC Simatic S7-1500, jež bude později užito pro řízení úloh. Jak je z obrázku patrné nejprve dochází k vykonání Startup programu nejčastěji tvořeného OB100 a dalšími funkcemi popřípadě funkčními bloky. Následně dochází k aktualizaci hodnot vstupů a výstupů a volá se hlavní program OB1 se všemi funkcemi a funkčními bloky. Po vykonání dochází k modifikaci fyzických vstupů a výstupů a program se cyklicky opakuje. Do cyklického vykonávání programu jsme taktéž schopni vnést další bloky na bázi přerušení, jako jsou bloky hardwarového či cyklického přerušení apod.

Jinými slovy po vykování poslední instrukce uživatelského programu zajistí systémový program tzv. otočku cyklu. V tomto procesu dojde k aktualizaci hodnot výstupů a vstupů – obrazy výstupů se přepíší do registrů výstupních periferních modulů a hodnoty vstupních modulů se převádějí do paměťových obrazů vstupů. Následně se aktualizují časové údaje pro časovače a systémové registry a provádějí se další úlohy jako ošetření komunikace a režijní úlohy.

Je také důležité si uvědomit, ve světle výše uvedeného, že PLC nepracuje s aktuálními hodnotami vstupů a výstupů ale s jejich obrazy uloženými v registrech. Aktualizace těchto hodnot, tedy předání obrazů výstupů k řízenému objektu a sejmутí aktuálních hodnot od řízeného objektu se provede pouze ve výše popsané fázi otočky cyklu. Je tím zajištěna lepší synchronizace vstupních a výstupních dat s během programu čímž se minimalizuje možnost vzniku chyb způsobených nevhodným souběhem dat. [5] [6]



Obrázek 3.1: Cyklické provádění programu v PLC Simatic S7-1500 [10]

Program v PLC můžeme tedy chápat jako určitou posloupnost instrukcí a příkazů jazyka, přičemž k jeho aktivaci dochází vlivem cyklického vykonávání v programové smyčce. Z toho plyne, že nemusíme programově ošetřovat to, aby se program po vykonání vrátil na začátek, protože to je zajištěno systémovým programem. Dále je zde patrná vlastnost PLC jakožto systému reálného času, jelikož vykonávaný program nesmí v programové smyčce setrvat příliš dlouho, jinak dojde k překročení doby cyklu, což představuje u systémů reálného času fatální chybu.

3.2 Typy řízených objektů

Abychom mohli systém správně řídit, je také důležité správně určit, o jaký systém se jedná a dle toho modifikovat řídicí algoritmy. Jinými slovy dle typu procesu určit jaký typ řídicího systému bude vhodné a možné použít. Dichotomii řízení můžeme spatřovat v dělení řízených subjektů na systémy spojité a diskrétní, přičemž každá s těchto oblastí se dále větví a rozvíjí tu předcházející.

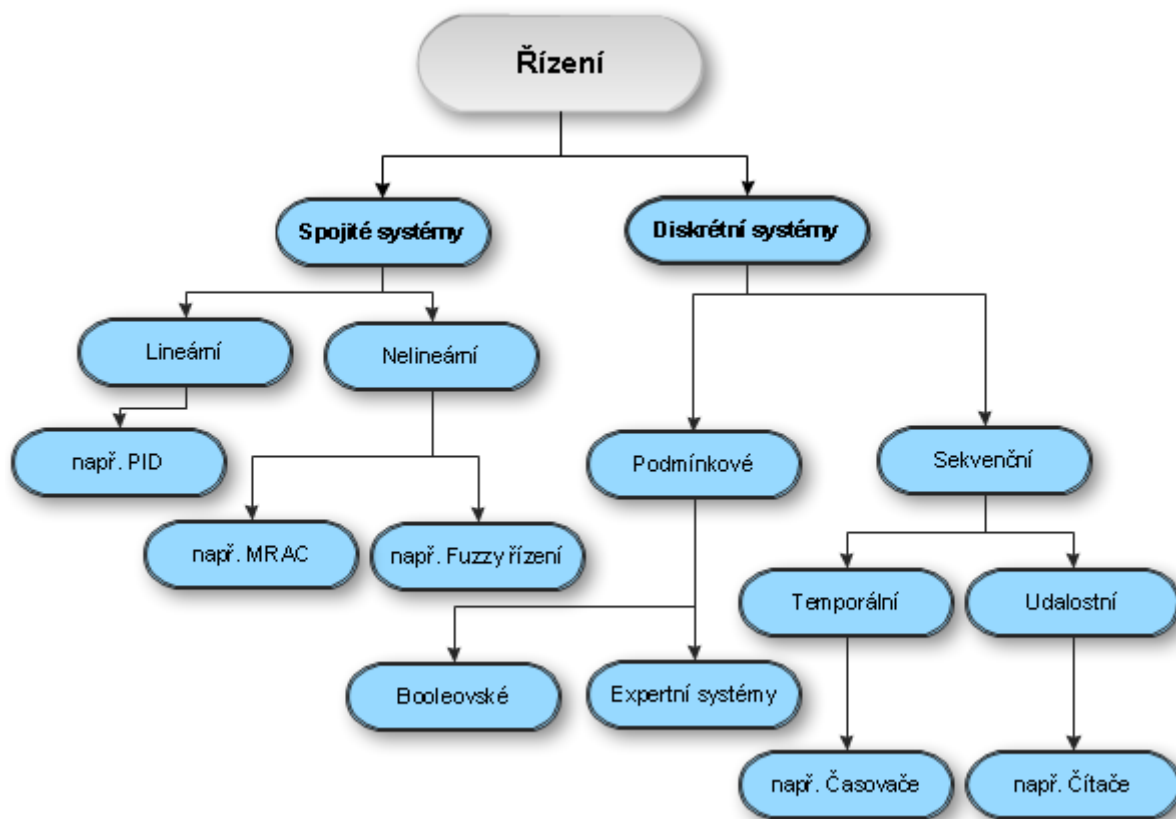
Jak vidíme na obrázku 3.2, existuje pestrá škála řízených systémů. Jako spojité systémy můžeme vnímat ty, u kterých se řízená veličina mění v čase plynule. Základ v této oblasti tvoří lineární systémy, jejichž analýza a identifikace je snazší, jelikož takovýto systém můžeme popsat diferenciální rovnicí, určit jeho přenos, jednoduše určit jeho stabilitu apod. Typickým představitelem je v této práci *pracoviště reakční*, které lze z hlediska teorie řízení vnímat jako lineární systém, u něhož je možno stanovit přenos a další sounáležitosti. Jak bude rozebíráno dále, jedná se o teplotní proces, jež se zpravidla aproximuje přenosem prvního nebo druhého řádu.

Většina reálných systémů je ovšem nelineárních, kde naše snahy, pokud je to možné, vedou na linearizaci, abychom zajistili platnost principu superpozice platného u lineárního systému a mohli tak použít metody analýzy lineárních systémů. Pokud ovšem systém linearizovat nelze, je řešení náročné, protože neexistují obecné metody řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Proto se k vyšetřování systému používají metody aproximace, numerické metody, Ljapunovova teorie stability apod. V této práci vzniká zajímavý nelineární systém třech nádrží v podobě *mixovacího pracoviště*, kdy voda v nádobách odtéká nelineárně. Zjednodušeně řečeno můžeme říct, že s klesající výškou hladiny je odtok menší. V praxi se povětšinou matematické modely složitějších nelineárních systémů nesestavují, ale naopak se využívají metody uvedení takovýchto systémů do provozu bez znalosti přesného matematického modelu. To značí, že je provedena experimentální identifikace a dle ní je stanovena vhodná metoda řízení. S ohledem na to, bude dále v práci rozebíráno řízení mixovacího pracoviště jako nelineárního systému, který však lze za určitých podmínek považovat za lineární. [7]

Další velkou skupinou systémů jsou diskrétní neboli nespojité systémy. Tyto systémy se vyznačují tím, že nereagují spojitě, ale reagují na vzniklou událost a to především pomocí logicky ovládaných prvků, ze kterých jsou složeny. Logicky v tom smyslu, že prvky soustavy jsou schopny nabývat diskrétních hodnot 0/1. Konkrétní typ diskrétního systému, který se vyskytuje v této práci, je *pracoviště plnicí*. Jak bude dále ukázáno, jedná se o sekvenční řízení.

U programovatelných automatů můžeme hovořit o číslicovém řízení, jelikož se vyznačují svou nespojitostí v čase. Tato vlastnost plyne z toho, že je řídicí algoritmus vykonáván cyklicky, vždy jen v určitých časových okamžicích. Je-li systém uprostřed cyklu, nereaguje na změny vstupních hodnot. Budeme-li tedy chtít řídit diskrétní systémy, dostáváme se k číslicové regulaci. Ta spočívá v tom, že se regulátor připojuje k regulované soustavě vždy jen na krátkou dobu v pravidelných intervalech. Po navzorkování analogové veličiny a převedení na číslicový tvar se vykoná řídicí algoritmus, kdy výsledkem je akční zásah. Je tedy zřejmé, že ačkoli je programovatelný automat číslicový stroj, je možné ho použít k řízení spojitých systémů. Použití číslicového řízení má také nespornou výhodu v tom smyslu,

že jsme díky použití číslicové techniky schopni zpracovávat i větší počet měřených veličin daného regulovaného systému a tím zvyšovat dosažitelnou kvalitu regulace, nemluvě o adaptaci na proměnné podmínky. [8]



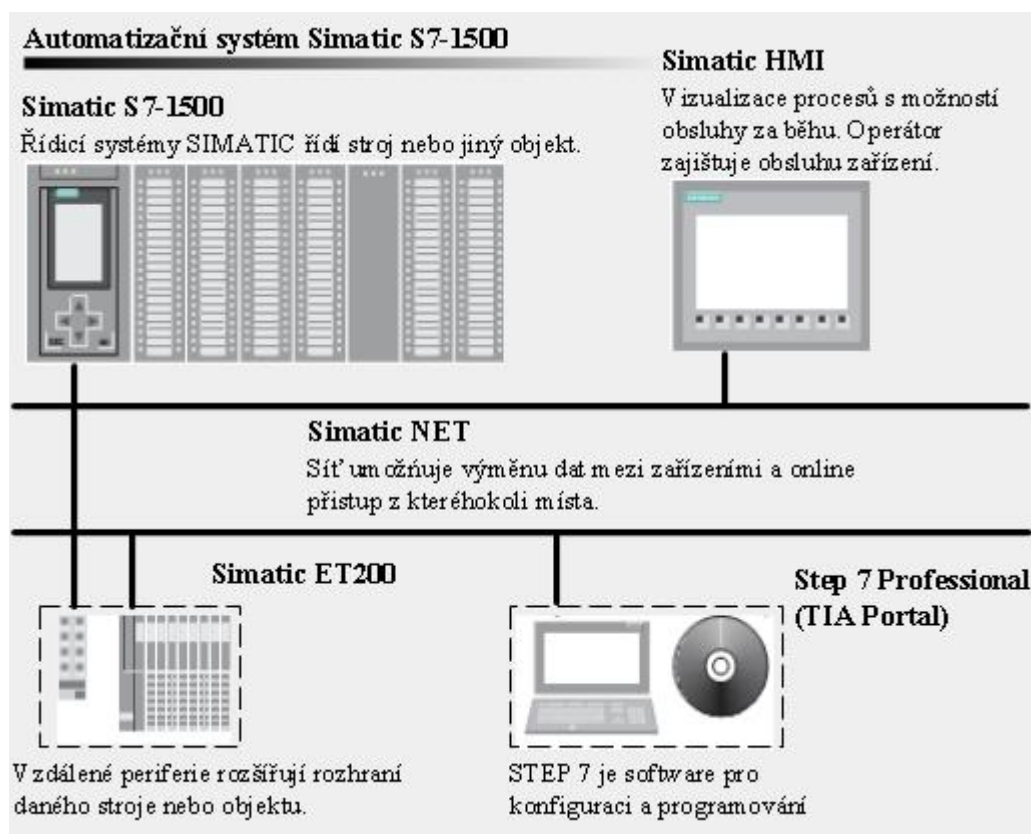
Obrázek 3.2: Dělení řízených objektů [9]

3.3 PLC Simatic S7-1500

Řízení všech výše uvedených úloh se bude realizovat pomocí programovatelného automatu Simatic S7-1500 od společnosti Siemens. Jedná se o novou produktovou řadu modulárních programovatelných automatů, které už od svého uvedení na trh nesou vizi společnosti o nastavení nových standardů v produktivitě a efektivitě průmyslové automatizace. Toho je dosaženo perfektní integrací do TIA Portal softwaru spolu s přidáním nových funkcí a vlastností, které počítají s potencionálním vývojem v oblasti automatizace.

Obrázek 3.3 podává ucelený pohled na celý automatizační systém s integrací programovatelného automatu S7-1500. Kromě samotného automatu sestávajícího s CPU, digitálních, analogových a jiných modulů, je zde modul distribuovaných vstupů a výstupů ET200 umožňující rozšíření o další vstupní a výstupní moduly komunikující přes PROFINET či PROFIBUS. Dále je zde HMI (Human Machine

Interface), což je uživatelské rozhraní sloužící k monitorování a řízení procesů. Komunikaci mezi jednotlivými automaty, distribuovanými vstupy/výstupy, HMI zařízeními a samotným programovacím zařízením (PC s Windows) zajišťuje SIMATIC NET. To vše zastřešuje vývojové prostředí TIA Portal, ve kterém probíhá konfigurace, parametrizace a samotné programování automatů. [10]



Obrázek 3.3: Architektura automatizačního systému s PLC S7-1500 [10]

3.3.1 Prvky PLC Simatic S7-1500

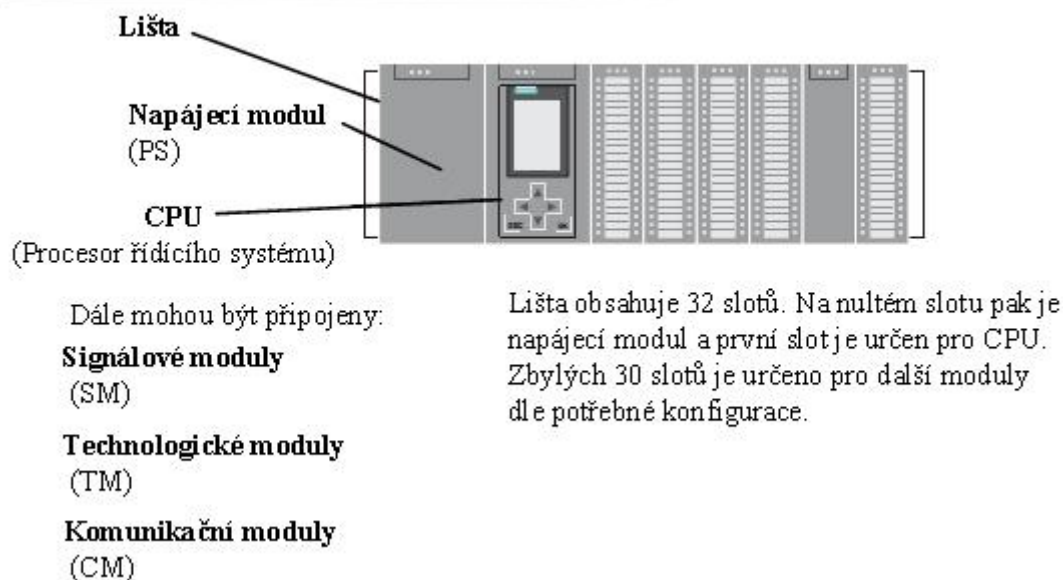
Celý programovatelný automat ve funkčním provedení tak, jak bude použit pro řízení všech procesních úloh, je složen z několika částí. První částí je samotný procesor, přičemž konkrétní typ, který bude použit, je CPU 1511-1 PN [11]. Dalšími částmi pak jsou digitální, analogové moduly a napájecí modul.

Na obrázku 3.4 je uvedeno obecné složení modulárního automatu S7-1500. Hlavní část celého automatu tvoří CPU obsahující operační systém a uživatelský program. Uživatelský program je nahrán na paměťovou kartu (SIMATIC Memory Card) a ta je vložena do CPU. Ke spuštění programu pak dochází v pracovní paměti CPU. Komunikace s ostatními automaty je zajištěna komunikačními rozhraními (bus interface) PROFINET, PROFIBUS apod. [10]

CPU lze tedy chápat jako inteligenci automatu, která realizuje soubor instrukcí a systémových služeb, přičemž komunikuje s vlastními i vzdálenými moduly, s nadřazeným přístrojem a samotným

programovacím přístrojem, kterým může být například PC. Důležitou věcí je paměťový prostor, který je rozdělen na části. Detailní rozpis rozdělení paměťového prostoru je pro všechny typy CPU S7-1500 popsáno v [12].

Komponenty řídicího systému Simatic S7-1500



Obrázek 3.4: Prvky PLC S7-1500 [10]

Signálové moduly jsou periferní vstupně/výstupní moduly zajišťující propojení CPU s řízeným strojem či procesem. Existují čtyři typy těchto signálových modulů – digitální vstupní, digitální výstupní, analogové vstupní a analogové výstupní moduly. Digitální vstupní moduly pak slouží k získání provozních stavů, ve kterých se stroj nebo řízený objekt nachází. Jedná se o binární signál, kde podle jeho napěťové úrovně mu je přiřazovaná logická 1 nebo 0. Digitální výstupní moduly slouží k opačné úloze, tedy k samotnému řízení stroje nebo procesu. Podobně je to také u analogových vstupních a výstupních modulů, které jsou určeny pro snímání analogových veličin, které jsou analogovými moduly automatu převedeny na digitální hodnoty.

Technologické moduly jsou „inteligentní“ vstupně výstupní moduly sloužící k předzpracování signálů přicházejících z řízených objektů nezávisle na CPU. Slouží primárně k činnostem, které není schopno CPU vykonat dostatečně rychle, jako je počítání pulsů, měření frekvence, rychlosti nebo detekce polohy pro řízení pohybu.

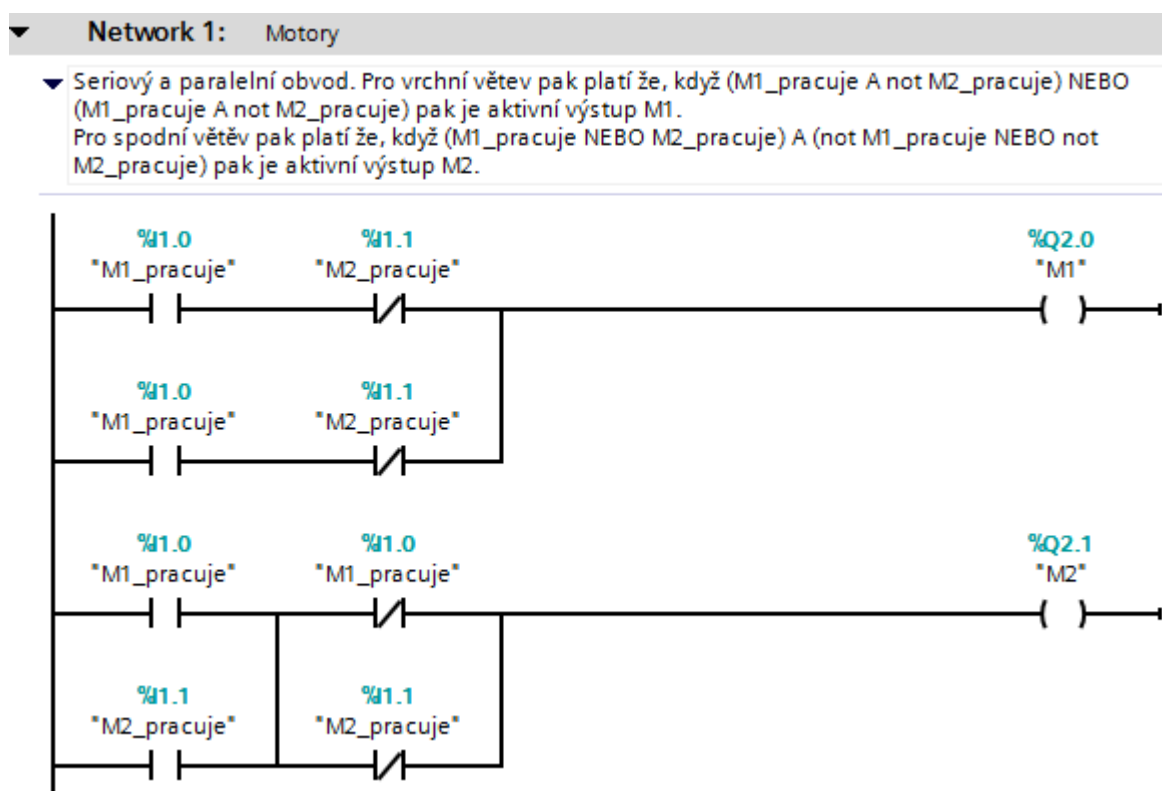
Komunikační moduly umožňují datový přenos přesahující standartní rozhraní, které poskytují CPU a do určité míry tak ulehčují práci CPU. Stabilizují fyzické spojení mezi subjekty, přebírají zodpovědnost za navázání spojení, přenos dat a další komunikaci, kterou určí CPU a uživatelský program.

Posledními moduly jsou napájecí moduly zajišťující napájení programovatelného automatu. Toto napájení lze rozšířit i pro napájení senzorů, pohonů apod., které působí jako zátěž vstupně výstupních modulů. [10]

3.3.2 Programovací jazyky PLC Simatic S7-1500

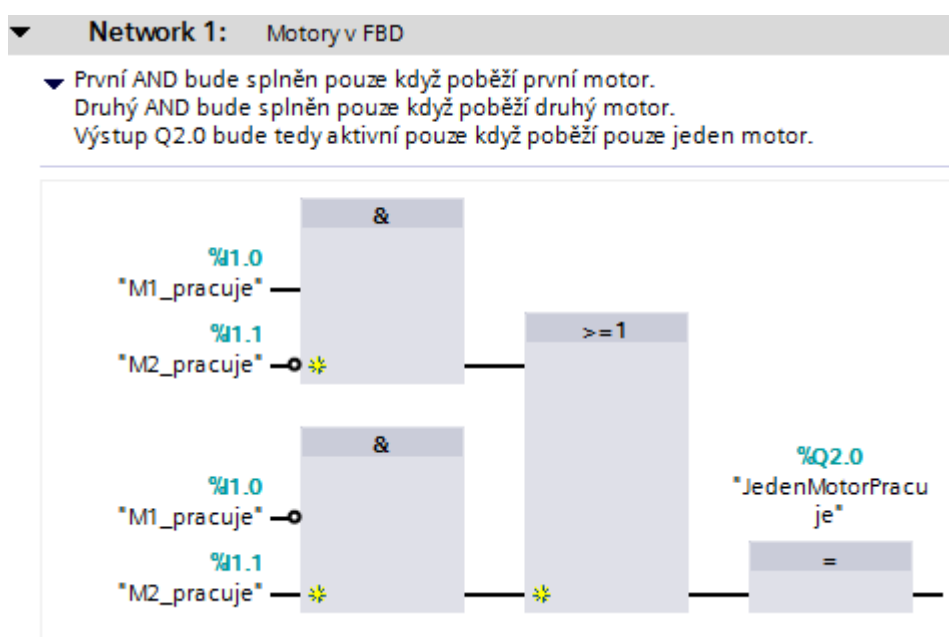
Automaty můžeme programovat několika jazyky, jež původně sloužily pro efektivní realizaci logických funkcí. Jazyky užívané pro programování automatů řady S7-1500 navazují na osvědčené programovací prostředky vycházející z řady S7-300/400 uvedené v [13], [14]. Všechny tyto programovací prostředky spadají do programovacího softwaru STEP 7 Professional, který je integrován do TIA Portalu.

Ladder logic LAD neboli jazyk reléových schémat, je jedním z jazyků užívaných pro programování automatů S7-1500. Vychází se z předpokladů reléové logiky, kde můžeme modelovat stavy binárního signálu pomocí sériového a paralelního spojení kontaktů, popřípadě kombinaci obojího. Tímto jsme schopni docílit realizace logických funkcí jako OR, AND apod., které nám dopomůžou k vytvoření požadovaného řídicího algoritmu. Kromě logických funkcí je zde možnost realizovat čítače, časovače, porovnávací, matematické operace apod.



Obrázek 3.5: Příklad realizace logických funkcí v jazyce LAD

Function block diagram FBD neboli jazyk funkčních bloků je dalším z jazyků používaných pro programování automatů S7-1500. Jedná se o grafický jazyk, kde jsou logické a jiné operace jsou integrovány do funkčních bloků popsaných svými vstupy a výstupy. Tyto funkční bloky poté porovnávají stavy 1 a 0 dle Booleovy logiky, přičemž výsledkem je RLO (result of logic operation), na základě kterého pracují na ně navazující funkce. Poznamenejme, že v praxi se jedná o nejrozšířenější a nejhojněji používaný programovací jazyk. Díky jeho jednoduchosti a efektivnosti je pro většinu řešených aplikací naprosto dostačující. [10] [13]



Obrázek 3.6: Příklad realizace logické funkce AND v jazyce FBD

Structured control language SCL neboli jazyk strukturovaného textu je další možností, kterou můžeme zvolit, chceme-li programovat automaty S7-1500. Tento jazyk je obdobou vyšších programovacích jazyků, jako je Pascal nebo C, přičemž jeho největší výhodou je úspornost a maximální názornost aplikovaných řídicích algoritmů. Jeho využití při řešení sofistikovanějších problémů řízení je nezastupitelné. Spolu s jazykem STL je v praxi hojně využíván pro implementaci především matematických algoritmů (linearizační funkcí prvků apod.) kde by byl LAD či FBD značně neefektivní.

```

1  (*
2   Ukázka FIFO registru v programu STL
3   *)
4  IF "Write" AND NOT "EM_write"
5      THEN "EM_write" := "Write"; GOTO Write_register;
6      ELSE "EM_write" := "Write";
7  END_IF;
8  IF "Read" AND NOT "EM_read"
9      THEN "EM_read" := "Read"; GOTO Read_register;
10     ELSE "EM_read" := "Read";
11 END_IF;
12 IF "Delete" AND NOT "EM_delete"
13     THEN "EM_delete" := "Delete"; GOTO Delete_register;
14     ELSE "EM_delete" := "Delete";
15 END_IF;
16 RETURN;

```

Obrázek 3.7: Příklad realizace FIFO registru v jazyce SCL [10]

Statement list STL neboli jazyk mnemokódů je v pořadí čtvrtý jazyk, který můžeme použít při programování automatů S7-1500. Jedná se o strojově orientovaný jazyk jako například assembler, tzn., že obsahuje aparát symbolického označení návěstí pro cíle skoků a volání, symbolická jména pro číselné hodnoty, pro pojmenování vstupních, výstupních a vnitřních proměnných apod. Tento jazyk je hojně používán pro možnost maximálně přizpůsobit řízenou úlohu možnostem PLC a vytěžit tak maximum z jeho instrukčního souboru. [6] [10] [14]

```

1  // Funkce AND
2      A      "M1_pracuje"
3      A      "M2_pracuje"
4      =      "ObaMotoryPracuji"    // Oba motory běží
5  // Funkce OR
6      O      "M1_pracuje"
7      O      "M2_pracuje"
8      =      "AlesponJedenMotorPracuje" // Alespon jeden motor běží
9  // Funkce Exclusive OR
10     X      "M1_pracuje"
11     X      "M2_pracuje"
12     =      "JenJedenMotorPracuje" // Jen jeden motor běží

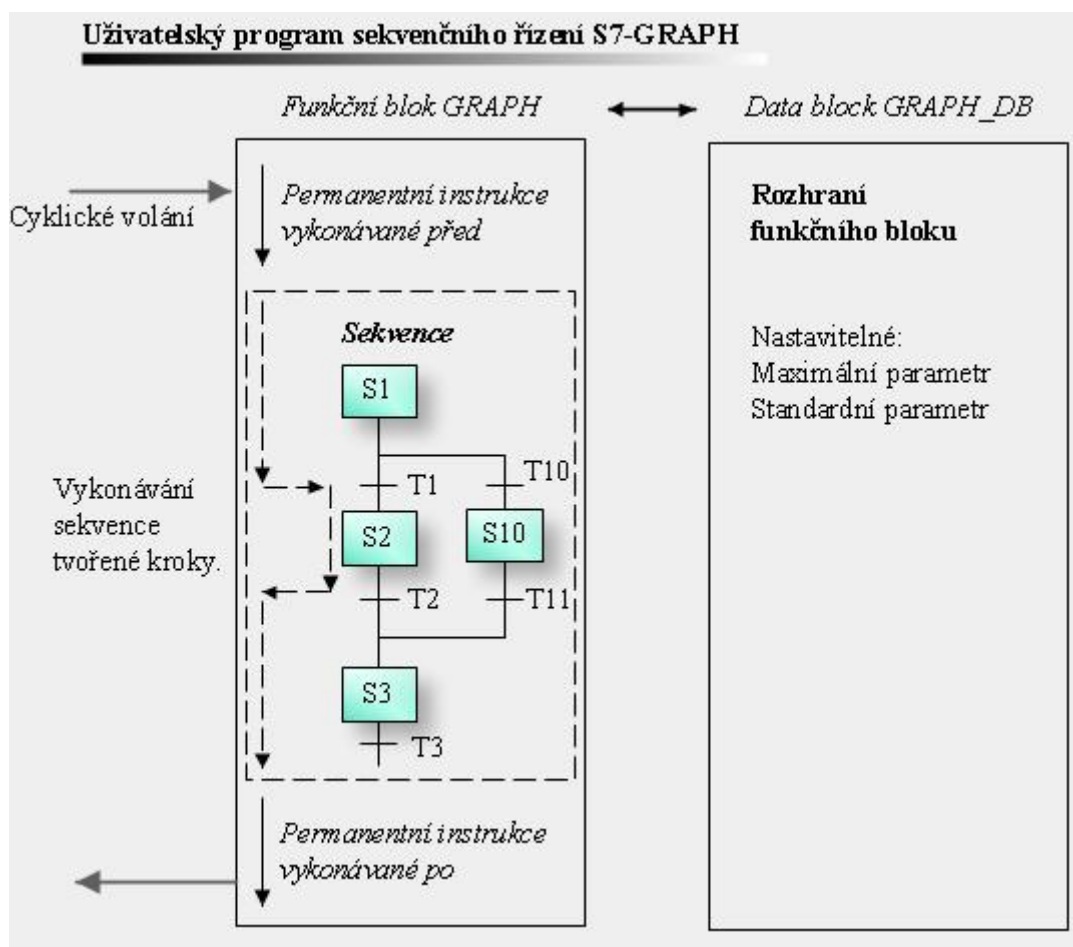
```

Obrázek 3.8: Příklad realizace logických funkcí v jazyce STL

S7-GRAPH sequential control je poslední ze způsobů jakými můžeme programovat automaty S7-1500. Jedná se o určitý typ sekvenčního řízení, kdy vstupní signály ovlivňují výstupní tak, že mají vliv na jejich časové sekvence. To značí, že je řídicí proces rozdělen na určitou posloupnost kroků, přičemž každý krok obsahuje jednu nebo více akcí jako je například zapnutí nebo vypnutí motoru. Tyto akce

jsou vykonávány, pouze pokud je daný krok aktivní. Přejechod do dalšího kroku je pak závislý na určitém přechodném stádiu (step enabling conditions), kterým může být například signál vyslaný řízeným subjektem nebo uplynutí doby platnosti zpoždění. To značí, že pokud řízený subjekt vyše signál, jsou splněny podmínky pro přechod do dalšího kroku a program přejde do dalšího kroku.

Samotné sekvenční řízení je tvořeno funkčním blokem GRAPH a datovým blokem GRAPH_DB přičemž funkční blok je tvořen samotnými sekvencemi a datový blok je jeho instancí obsahující vnitřní strukturu a další data (obr. 3.9). Také je vidět, že funkční blok nejprve zpracovává trvalé instrukce, které předcházejí samotným sekvencím a které jsou prováděny v každém cyklu. [10]



Obrázek 3.9: Součásti a vlastnosti řízení pomocí jazyku S7-GRAPH [10]

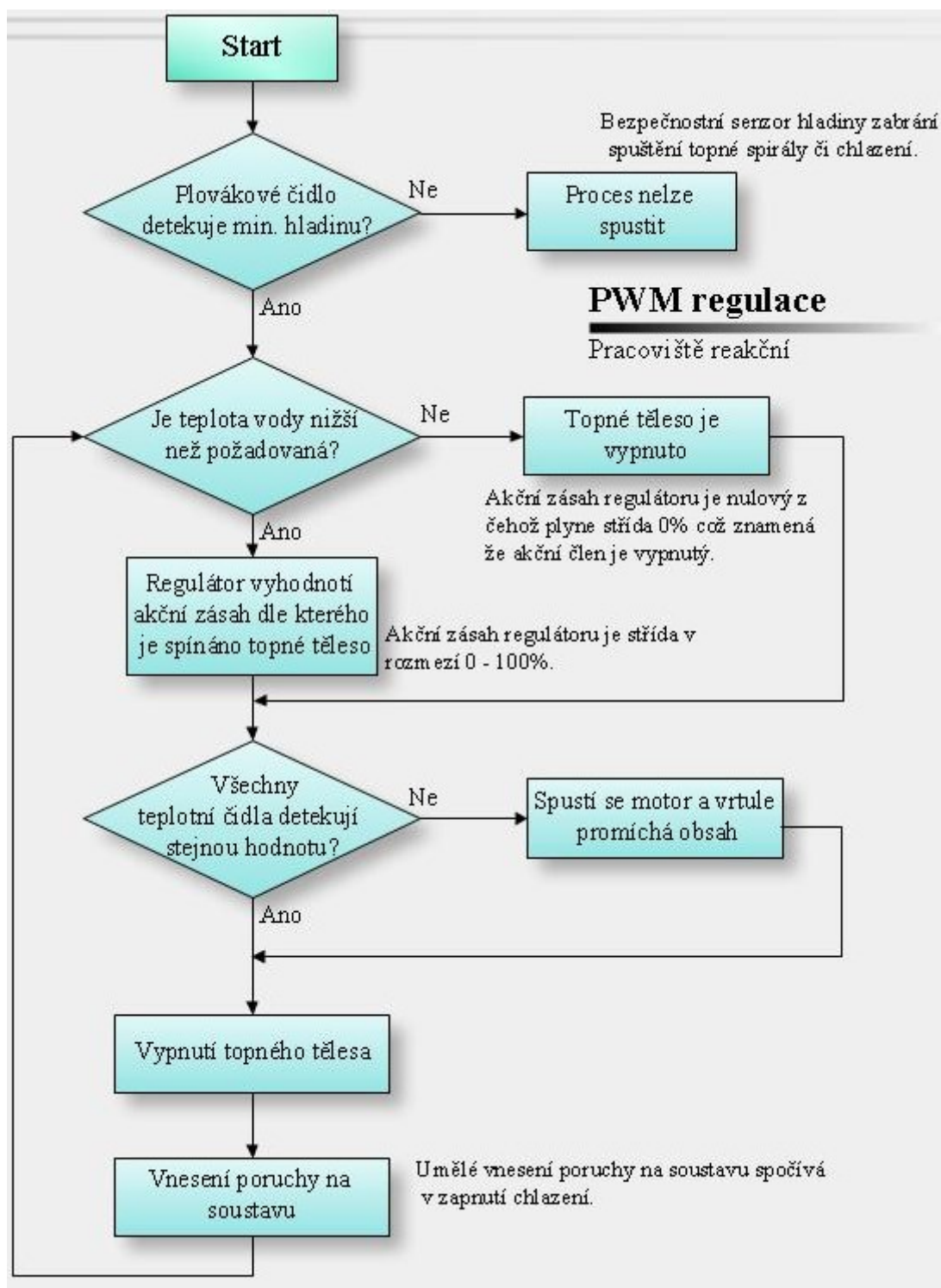
4 Funkční analýza

Abychom mohli správně implementovat řídicí algoritmy je potřeba správně definovat funkční postupy, které budou na daných pracovištích vykonávány. Úkolem této části práce je definovat procesy, které budou vykonávány a provést jejich detailní analýzu tak, aby bylo zřejmé, co bude řízeno a prováděno v té které části celého procesu řízení.

Pro nastínění vykonávaných sekvencí se povětšinou používají Petriho sítě nebo UML diagramy. V následujících podkapitolách proto budou uvedeny UML diagramy pro všechna analyzována pracoviště. Na závěr této kapitoly je poté uvedeno shrnutí poznatků o řízení v podobě toho, že bude určeno, o jaký typ úlohy se jedná a jaký bude další uvažovaný postup řízení.

4.1 Funkční analýza reakčního pracoviště

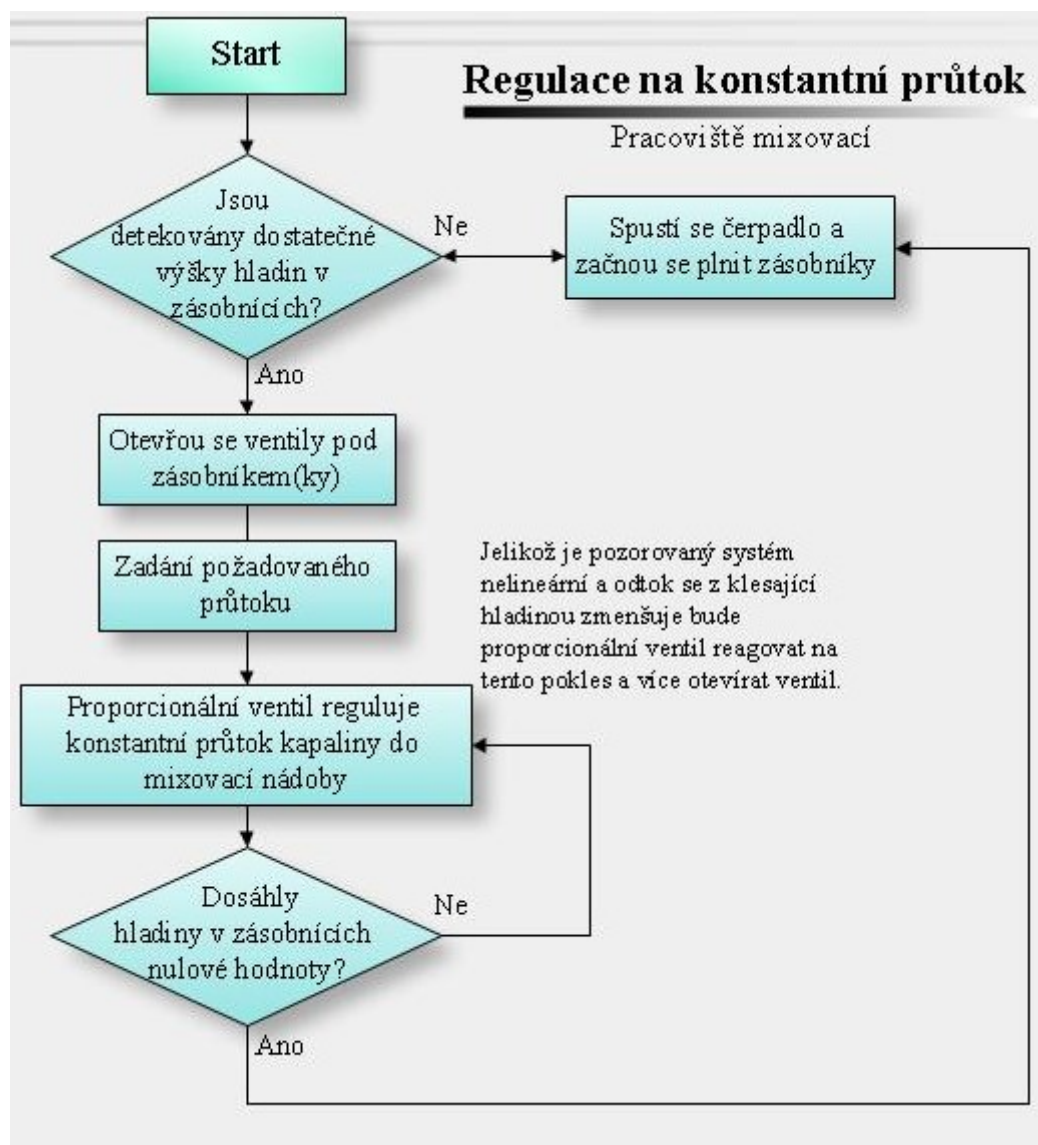
Funkční analýza reakčního pracoviště v podobě vývojového diagramu procesu, uvedená na obrázku 4.1, využívá součástí pracoviště uvedených na obrázku 2.2.



Obrázek 4.1: Vývojový diagram řízení reakčního pracoviště

4.2 Funkční analýza mixovacího pracoviště

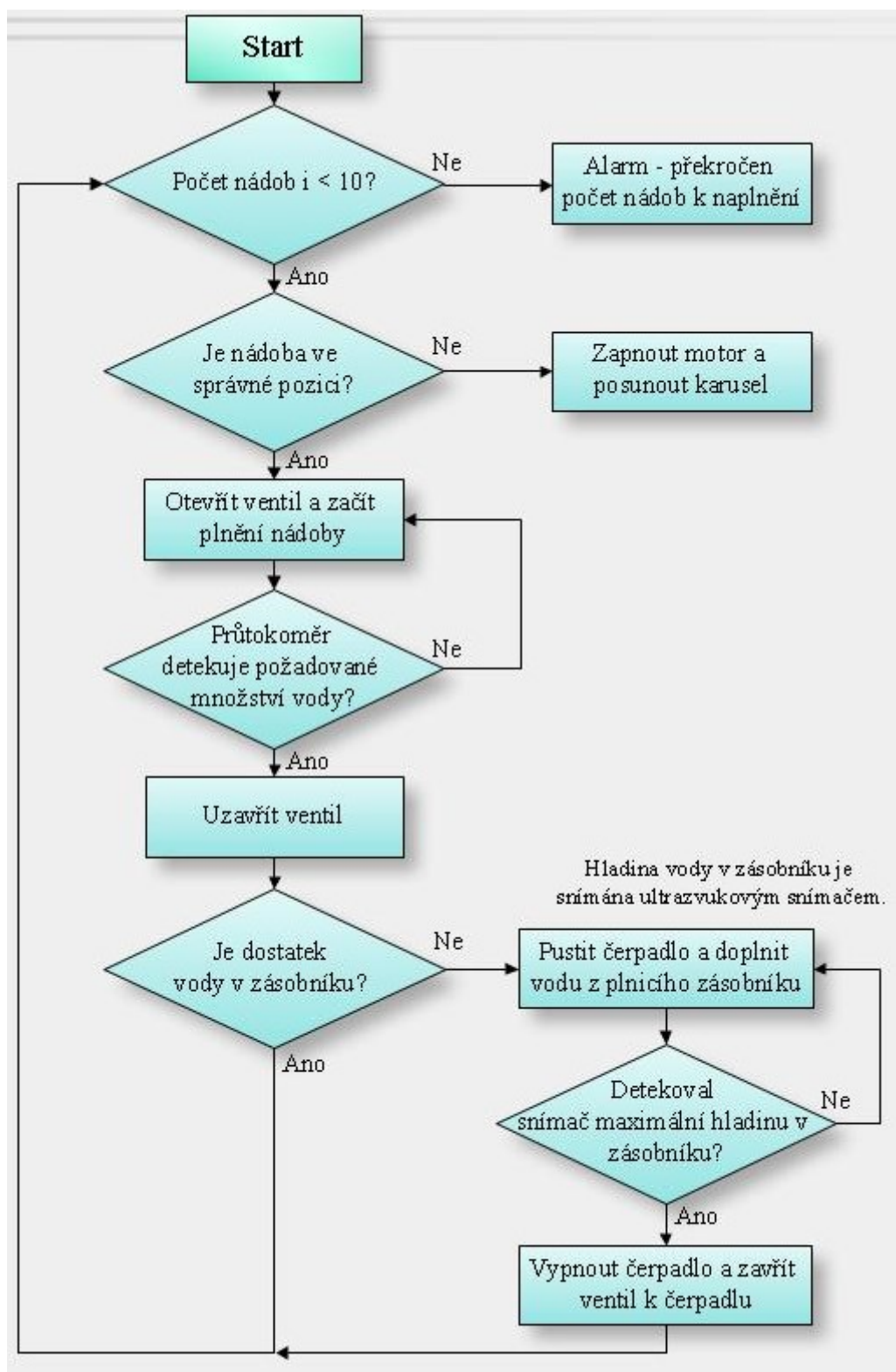
Jednotlivé prvky tvořící pracoviště, které jsou uvažovány v diagramu na obrázku 4.2 jsou zakresleny na obrázku 2.4.



Obrázek 4.2: Vývojový diagram mixovacího pracoviště

4.3 Funkční analýza plnicího pracoviště

Jednotlivé prvky plnicího pracoviště, se kterými pracuje vývojový diagram procesu na obrázku 4.3 jsou uvedeny na obrázku 2.6.



Obrázek 4.3: Vývojový diagram plnicího pracoviště

4.4 Shrnutí poznatků o řízení

Výše uvedený rozbor pomocí funkčních analýz zasluhuje komentář doplňující vlastnosti soustav v návaznosti na prvky (uvedené v tabulkách 2.1, 2.2 a 2.3), které do značné míry definují možnosti řízení. Na následujících řádcích proto bude uvedeno, o jaký typ soustavy se jedná a jaký typ řízení je pro tuto soustavu vhodný.

4.4.1 Poznátky o řízení reakčního pracoviště

Tuto úlohu lze realizovat jako regulační jelikož je možno identifikovat akční členy působící na soustavu ve formě tepného tělesa. Zároveň je zde zpětná vazba realizována měřením teplot v nádobě.

Můžeme říct, že půjde o PWM regulaci, která bude reprezentována pulzně-šířkovou modulací. Rozsah střídy 0 až 100 % by odpovídal akčnímu zásahu, dle kterého by bylo spínáno topné těleso, a střída 0 % by odpovídala stavu, kdy by bylo topení vypnuto. Ačkoli by se mohlo zdát, že jde o dvoustavovou regulaci, díky diskrétnímu ovládání topného tělesa, je potřeba vzít v úvahu, že akční zásah vyhodnocený regulátorem je spojitý v rozmezí 0 – 100%. Z toho plyne, že tuto regulaci můžeme označit jako spojitou PID regulaci, která bude realizována pomocí PWM. Detailní princip vykonávání PWM je poté rozebrán později, v kapitolách realizace algoritmů řízení.

Při regulaci se taktéž vychází z myšlenky, že je zapnuto topení nebo chlazení, nikoli obojí dohromady jelikož by to nedávalo smysl. Jelikož je chlazení efektivnější než topení, je vnášení poruchy formou dlouhodobého chlazení nelogické, protože nikdy nedojde k vyregulování na požadovanou teplotu. Jako logicky přijatelná porucha se jeví krátkodobé spuštění chlazení, které způsobí teplotní výkyv, se kterým se bude muset regulátor vypořádat. Jako skutečná hodnota regulované veličiny je zaváděna do zpětné vazby zprůměrována hodnota všech čtyřech teplotních čidel v nádobě.

Detailnější analýza reakčního pracoviště z hlediska konstrukčního uspořádání a jeho vliv na celkové řízení modelu je uvedeno dále v kapitolách zabývajících se identifikací a návrhem regulátoru pro reakční pracoviště.

4.4.2 Poznátky o řízení mixovacího pracoviště

Tuto úlohu lze taktéž realizovat jako regulační v tom smyslu, že budeme plynule regulovat konstantní odtok kapaliny do nádrže pomocí proporcionálního ventilu.

Aby bylo možné hovořit o regulaci je potřeba zajistit zpětnou vazbu, která bude v případě mixovacího pracoviště zajištěna průtokoměrem snímajícím odtok se zásobníků s kapalinou. Na základě této informace pak bude možné regulovat na konstantní odtok. Vlivem nelineárního odtoku kapaliny z nádrží se bude odtok v čase zmenšovat, přičemž úlohou regulátoru bude postupné otevírání popřípadě zavírání proporcionálního ventilu tak, aby byl zajištěn konstantní průtok. Akčním zásahem je tedy ovládání proporcionálního ventilu.

Poznamenejme, že výslednou regulovanou soustavu bude tvořit proporcionální ventil spolu s potrubím, kdy hladiny zásobníků a přítok od čerpadla budeme vnímat jako poruchu. Ačkoli by se mohlo na první pohled zdát, že se jedná o pouhé ovládání nikoli o regulaci, bude později v práci ukázáno, jakou dynamiku proporcionální ventil vnáší do soustavy a jaké možnosti řízení z toho vyplývají.

Vzhledem k rozsahu možností jakými lze tuto soustavu vnímat jsou dále v textu zařazeny kapitoly zabývající se identifikací této soustavy a speciální metodou návrhu regulátoru. Později bude také rozebráno konstrukční uspořádání soustavy a jeho vliv na výslednou regulaci.

4.4.3 Poznatky o řízení plnicího pracoviště

Tato úloha je čistě sekvenčního charakteru. Jedná se o sekvenční řízení v otevřené smyčce, tzn. ovládání. Jelikož je úloha tvořena převážně diskrétními prvky neskýtá možnost cokoli regulovat. Jediným analogovým prvkem soustavy je ultrazvukový snímač hladiny v zásobníku. Bude se tedy jednat o simulaci modelu plnicí linky, která bude mít za úkol plnit nádoby dle pokynů obsluhy. Celý proces je tedy znázorněn na obrázku 4.3.

5 Matematicko-fyzikální analýza a identifikace

Stanovení matematického modelu a identifikace soustavy je nezbytným krokem řízení a to především z důvodů poskytnutí apriorních informací o soustavě a jejím chování. Nicméně ne u všech výše zmíněných pracovišť má smysl stanovovat matematický model a soustavu identifikovat. Pokud vezmeme v úvahu pracoviště plnicí, docházíme k závěru, že se jedná o proces ovládání a tedy ztrácí význam matematického popisu a identifikace.

Naopak u reakčního a mixovacího pracoviště je stanovení matematického modelu klíčovým prvkem při určení výsledného přenosu a následného návrhu regulátoru. U obou regulačních soustav rozumíme matematickým modelem odezvu soustavy na jednotkový skok, z níž jsme pak schopni identifikovat přenos a nastavit vhodné parametry PID regulátoru.

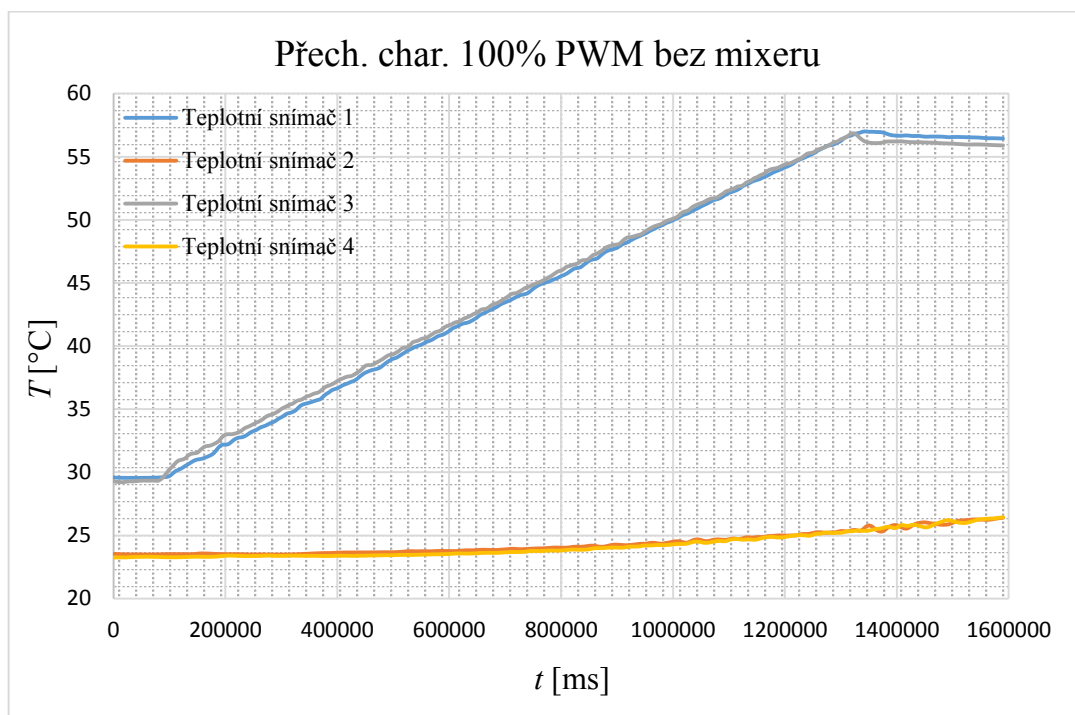
5.1 Identifikace reakčního pracoviště

Při modelování tepelných procesů jsme povětšinou schopni modelovat vlastnosti daného systému pomocí přenosů prvního nebo druhého řádu. Vzhledem k velkým časovým konstantám, které má reakční pracoviště se nabízí dva úhly pohledu. Jak je vidět z níže uvedených charakteristik, odezva reakčního pracoviště na jednotkový skok nemá charakter tepelných procesů běžně uvažovaných v teorii řízení. Proto je prvním, a jak dál bude ukázáno zcela vyhovujícím, pohledem řídit tuto soustavu jako integrační soustavu s velkými časovými konstantami. Druhý možný způsob je proložit změřené charakteristiky exponenciálou a na základě toho určit standardní přenos prvního řádu.

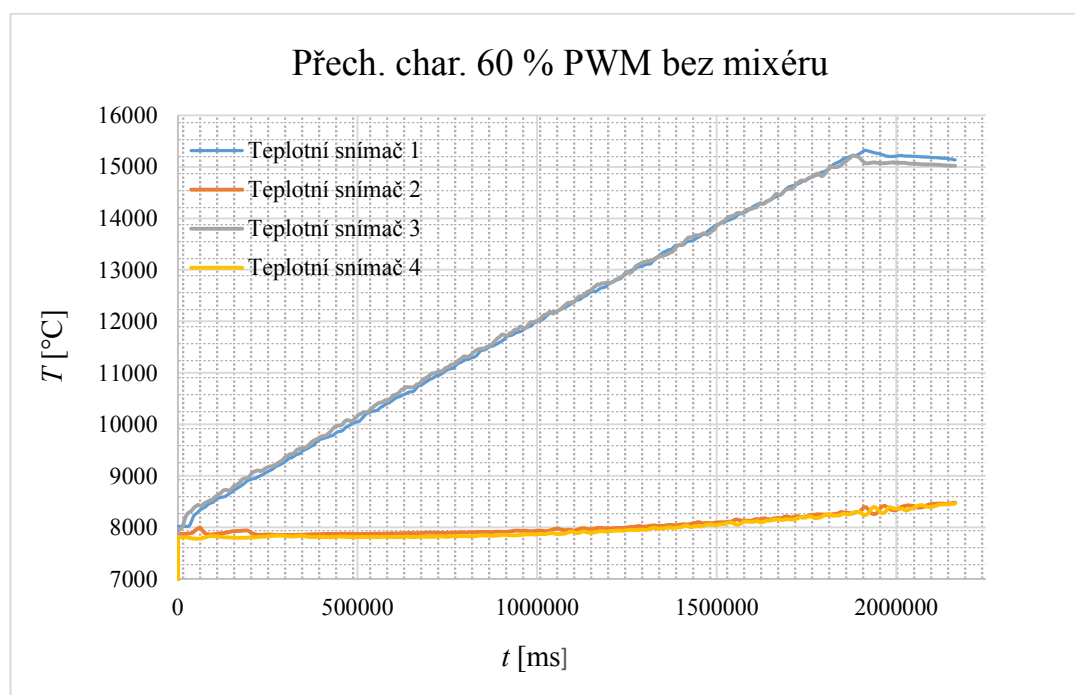
Při identifikaci reakčního pracoviště je tedy nutné změřit přechodové charakteristiky teplotních snímačů a následně určit aproximovaný přenos soustavy. Vzhledem k tomu, že konstrukční uspořádání reakčního pracoviště nabízí mnoho různých pohledů na regulaci, jsou níže uvedeny různé druhy měřených přechodových charakteristik. Tím je myšleno, že díky tomu, že jsou v nádobě čtyři teplotní snímače je možno provádět regulaci podle každého jednotlivého senzoru nebo podle průměrné teploty v nádrži. Z níže uvedených charakteristik je taktéž patrné jak klíčovou roli hraje mixér, pokud chceme regulovat podle průměrné teploty v nádobě.

Je také potřeba zmínit omezení soustavy, které má dramatický vliv na její případnou funkčnost, co se týče regulace teploty. Toto omezení plyne z bezpečnostního termostatu, který je umístěn nad topným tělesem a který, pokud teplota v nádrži přesáhne 50°C automaticky vypne topné těleso a neumožní jeho ovládání, dokud teplota neklesne pod bezpečnostní limit. Tento fakt je taktéž patrný z níže uvedených charakteristik.

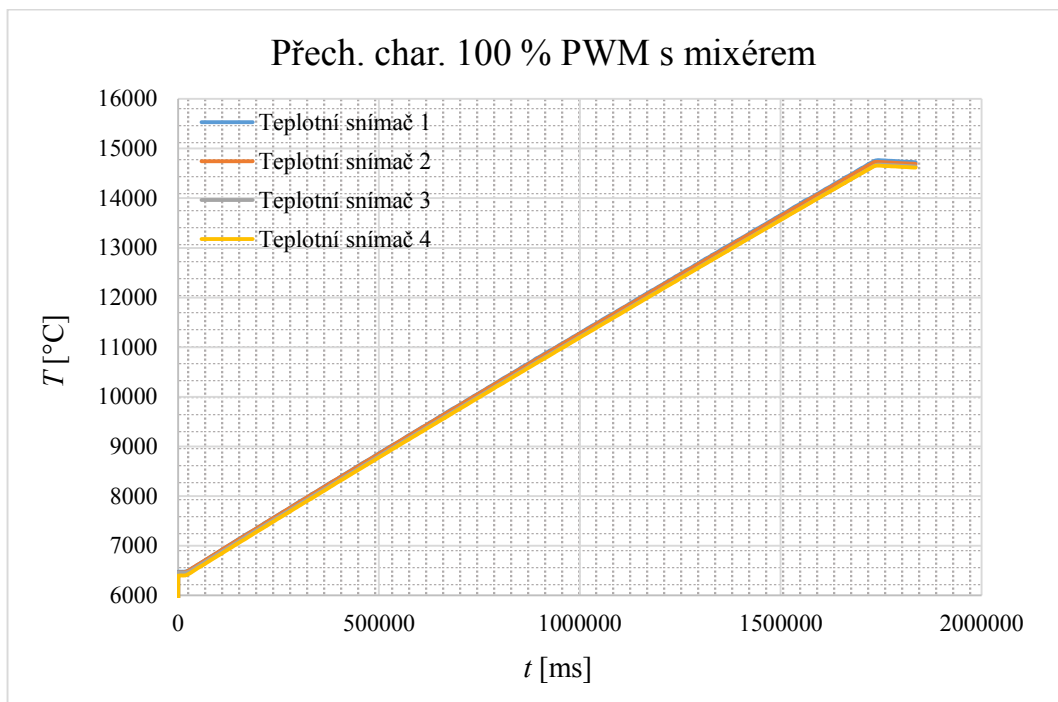
Z tohoto důvodu byly provedeny měření, kdy za pomoci různé střídy PWM bylo topné těleso spínáno a tak byl snížen celkový výkon tělesa v domnění, že bude možno změřit přechodovou charakteristiku systému bez toho, aby byla ovlivněna bezpečnostním termostatem. Jak je níže vidět ani 30% střída neumožnila tento bezpečnostní prvek obejít.



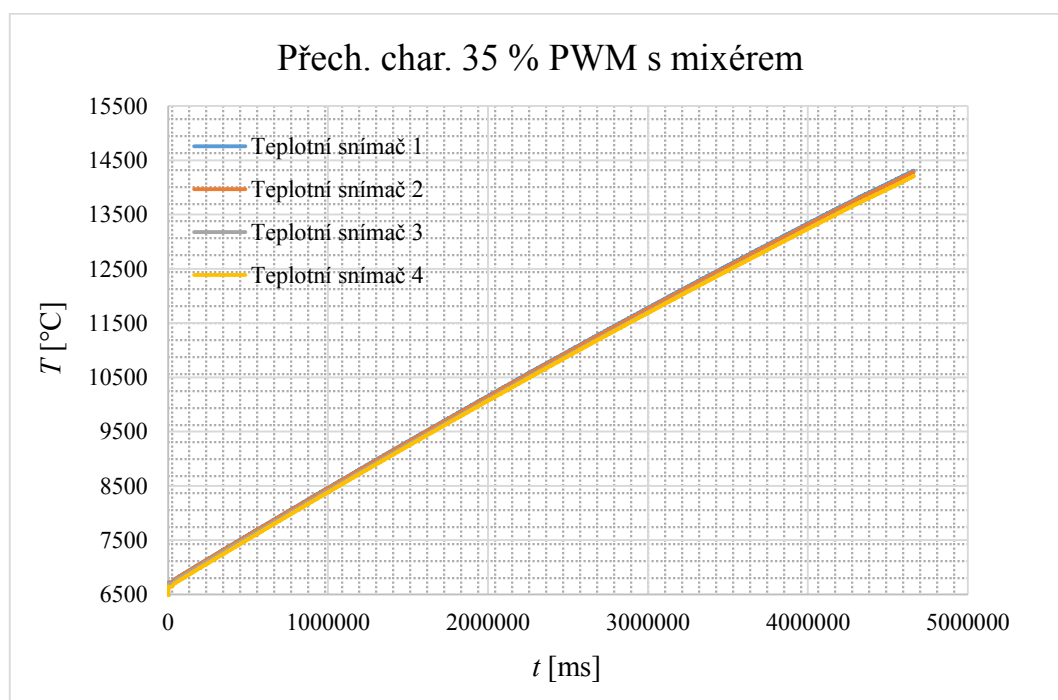
Obrázek 5.1: Přechodová charakteristika systému se 100% PWM bez mixéru



Obrázek 5.2: Přechodová charakteristika systému se 100% PWM bez mixéru



Obrázek 5.3: Přechodová charakteristika systému se 100% PWM s mixérem



Obrázek 5.4: Přechodová charakteristika systému se 35% PWM s mixérem

Hodnoty teplot jsou na některých charakteristikách v analogovém tvaru. Tento tvar však nemá vliv na výsledné přechodové charakteristiky.

Jak už bylo zmíněno dříve, budeme na soustavu nahlížet jako na integrační soustavu s velkými časovými konstantami. Proto i následující identifikace je provedena dle pravidel identifikace integračních soustav bez setrvačností či dopravních zpoždění.

Abychom mohli stanovit výsledný přenos soustavy, je nejprve nutné určit zesílení soustavy. Na základě informací z přechodové charakteristiky můžeme psát:

$$\begin{aligned}\Delta T &= T - T_0 = T - 26,42 \\ \Delta T &= 54,53 - 26,42 = \underline{\underline{28,11}}\end{aligned}$$

Zesílení soustavy pak můžeme psát jako:

$$K = \frac{\Delta T}{T} = \frac{28,11}{100}$$

Z výše uvedeného jsme pak schopni definovat přenos integrační soustavy jako:

$$G(s) = \frac{K}{Ts} = \frac{\frac{28,11}{100}}{26,42s} = \frac{0,2811}{26,42s}$$

Z výše uvedeného přenosu pak můžeme sledovat velmi pomalou dynamiku celé soustavy. Tato dynamika je určena velkou časovou konstantou spolu s malým zesílením soustavy.

Závěrem této části je možno poznamenat několik souvislostí vyplývajících z celého procesu identifikace této tepelné soustavy jako integrační soustavy s dlouhými časovými konstantami. Ačkoli všechny výše uvedené přechodové charakteristiky vykazují integrační charakter je potřeba uvědomit si, že z hlediska teorie řízení (a dle fyzikální podstaty jevu) se stále jedná o tepelný proces standardně aproximovatelný soustavou se setrvačností prvního řádu. Proto lze usuzovat, že výše uvedené přechodové charakteristiky jsou pouze malé, lineární části exponenciál, které obvykle procesy tohoto typu popisují. Proto by se mohla zdát, z pohledu teorie řízení, identifikace této soustavy jako integrační jako poměrně velká kvalitativní změna v řízení této soustavy. Nicméně z obrázků 6.2 a 6.3, které ukazují průběh regulace, je patrné, že to na výsledek regulace nemá vliv.

5.1.1 Návrh regulátoru pro reakční pracoviště

Známe-li přenos reakčního pracoviště jako soustavy je možné přistoupit k návrhu regulátoru. Z praxe je známo, že pro řízení statických soustav s dlouhými časovými konstantami nebo dopravním zpožděním se vyplatí velké proporcionální zesílení a vhodně zvolená integrační složka, z čehož plyne použití PI regulátoru.

Chceme-li být naprosto korektní, musíme uvážit také vliv integrační složky regulátoru na výslednou regulaci. Jak je známo, tato složka se stará o vyregulování trvalé regulační odchylky na nulovou hodnotu ale zároveň zpomaluje regulační děj. V případě reakčního pracoviště jako soustavy to ovšem nemá žádný význam, jelikož je použita regulace pomocí PWM, což prakticky znamená, že je topné těleso zapnuto nebo vypnuto. Vyhodnotí-li tedy regulátor určitý akční zásah a topné těleso je sepnuto, nemá na to použití I složky žádný vliv. Jinými slovy, topné těleso nemůže být ovládáno spojitě, a proto tedy použití I složky na regulaci nemá vliv.

Pomocí Matlabu (funkce pidtune) tedy po zadání přenosu obdržíme tento přenos regulátoru:

$$G_R(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} = 81,4 + 47 \cdot \frac{1}{s}$$

,což je přenos PI regulátoru, který bude použit pro regulaci teploty reakčního pracoviště.

Jak už bylo o odstavce dříve zmíněno, význam I složky je při regulaci reakčního pracoviště zanedbatelný. Jelikož je samotná soustava integračního charakteru není nutné do regulátoru pro tuto soustavu přidávat I složku do regulátoru. Z tohoto předpokladu plyne, že lze pro regulování této soustavy použít i samotnou proporcionální složku regulátoru a přesto dosáhnout nulové regulační odchylky.

Pomocí Matlabu tedy znovu vypočteme konstanty regulátoru, s tím, že požadovaný regulátor bude obsahovat pouze P složku. Získáme:

$$G_R(s) = K_P = \underline{\underline{94}}$$

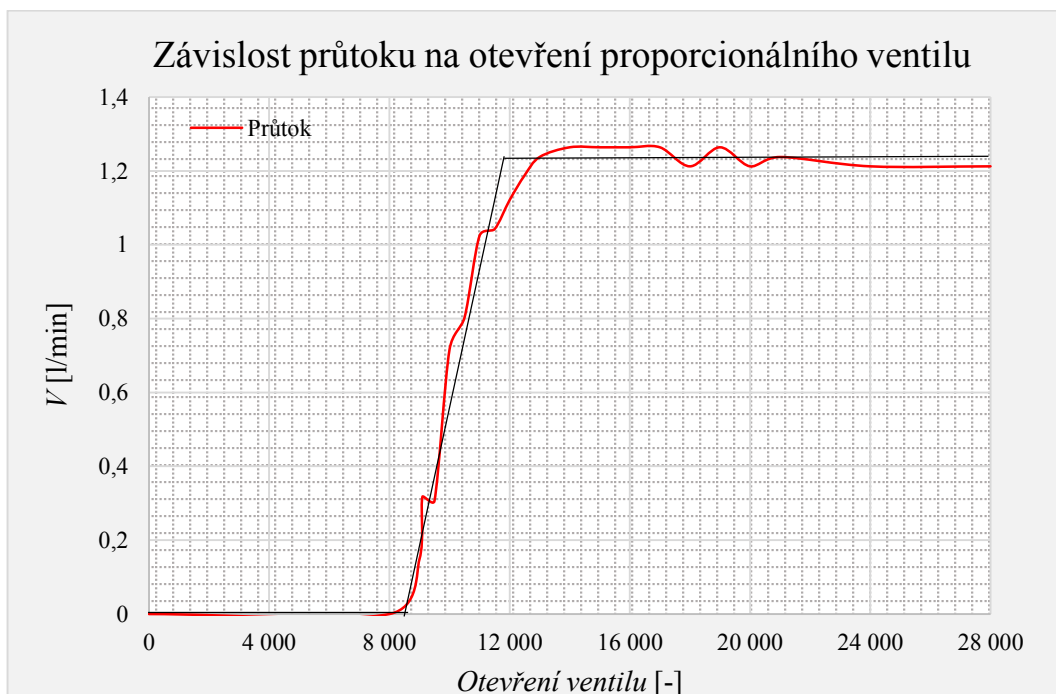
,což je přenos P regulátoru, který bude taktéž použit pro regulaci teploty reakčního pracoviště.

Poslední důležitá poznámka týkající se návrhu regulátoru je uvážení omezení akčního zásahu plynoucího z konstrukčního uspořádání reakčního pracoviště. Z důvodu použití PWM pro ovládání spínání topného tělesa je akční zásah omezen maximálním výkonem topného tělesa. Pokud bychom tedy chtěli simulovat vlastnosti systému, je potřeba si tuto nelinearitu akčního zásahu uvědomit a zohlednit. Právě tato nelinearita typu saturace akčního zásahu způsobuje, že soustava má velké časové konstanty a regulační děj je dlouhý (viz. obrázky 6.2 a 6.3).

5.2 Identifikace mixovacího pracoviště

Před samotným procesem identifikace mixovacího pracoviště jako dynamické soustavy je potřeba uvést několik souvislostí vedoucích ke správnému porozumění navržené regulace.

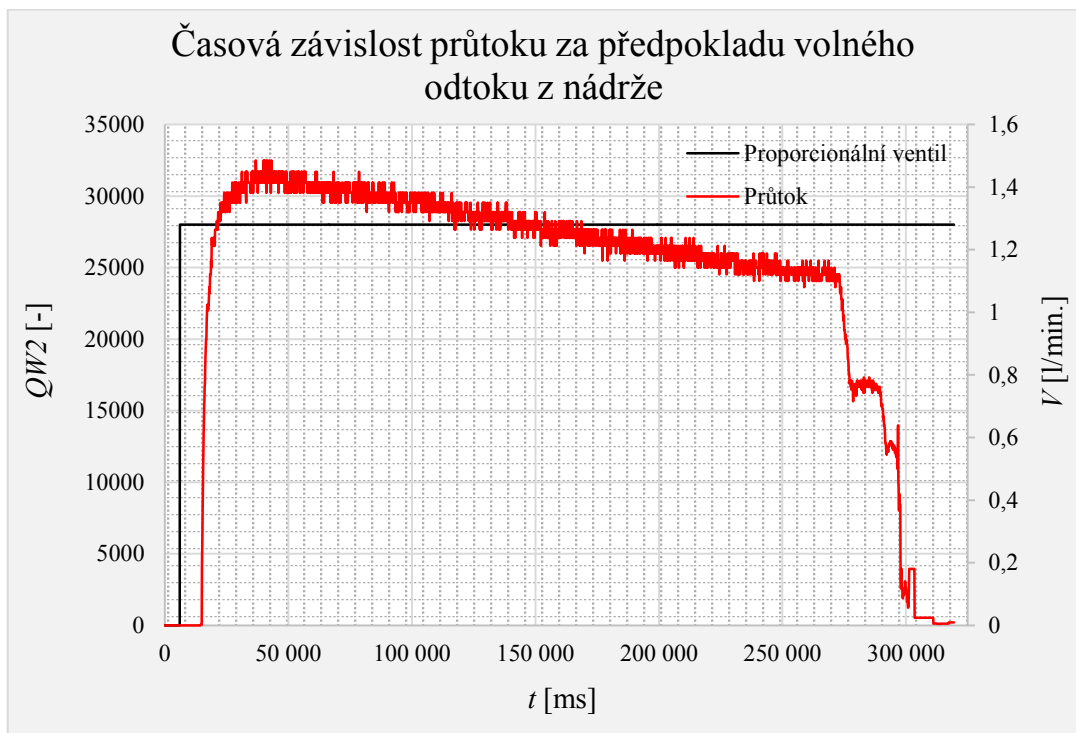
Nejprve je potřeba zmínit vlastnosti proporcionálního ventilu, který vnáší do celého systému požadovanou dynamiku a který zároveň slouží jako akční zásah působící na soustavu. Jak je vidět ze statické charakteristiky ventilu uvedené na obrázku 5.5 je zde velmi úzké pásmo, cca od 3,5 do 4,2 V, kdy průtok vzroste od nulové hodnoty po maximální hodnotu průtoku. Jak bude ukázáno dále, tento efekt má významný vliv na celkovou dynamiku soustavy jelikož vnáší do celkového přenosu soustavy dopravní zpoždění. Pro úplnost ještě poznamenejme, že otevření ventilu je na obrázku 5.5 a dalších v analogovém tvaru, který po převedení odpovídá rozsahu 0 – 10 V.



Obrázek 5.5: Statická charakteristika proporcionálního ventilu mixovacího pracoviště

Známe-li statickou charakteristiku proporcionálního ventilu, je možné přistoupit k přechodové charakteristice systému. I zde je ovšem několik souvislostí, které je potřeba při návrhu regulace uvážit. Především je nutné si uvědomit, co chápeme jako soustavu a co bude představovat případnou poruchu.

Pokud bychom uvažovali jako soustavu proporcionální ventil včetně potrubí a zásobníků je potřeba počítat s nelineárním odtokem kapaliny ze zásobníků (viz obrázek 5.6). Tento fakt činí z pozorovaného systému nelineární systém, který nelze popisovat standartními metodami. Nicméně jelikož dynamika odtoku není velká je možno prohlásit tento systém za lineární v okolí pracovního bodu a dále pracovat s tímto systémem jako lineárním.

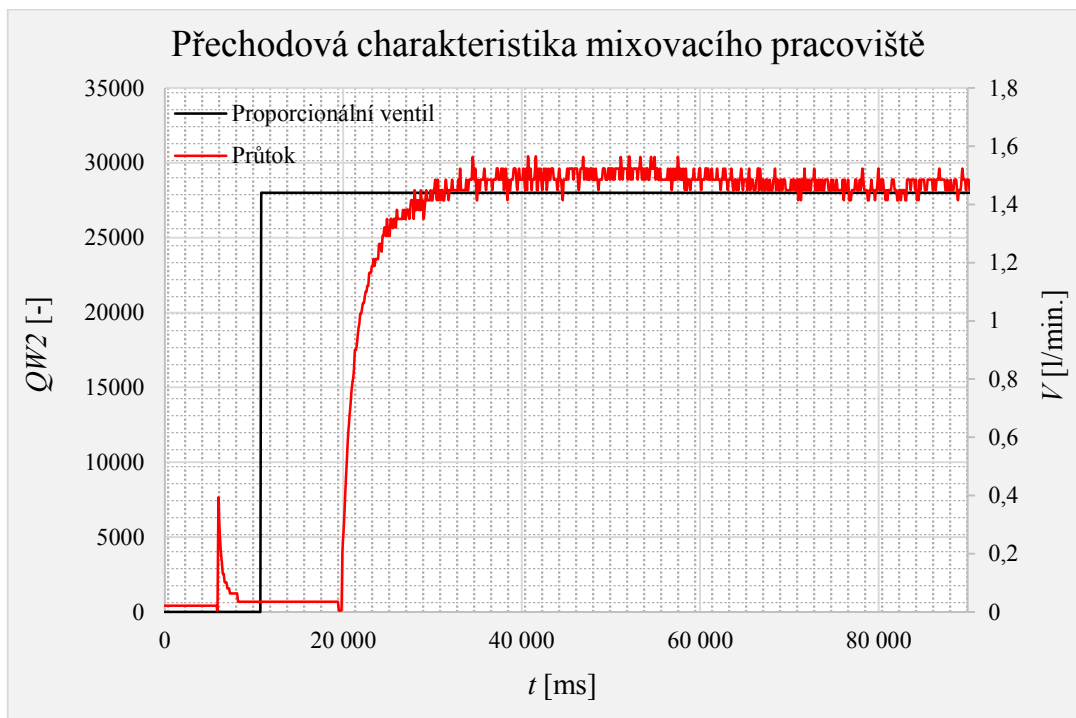


Obrázek 5.6: Nelinearita systému za předpokladu volného odtoku z nádrže mixovacího pracoviště

Pokud ale uvážíme soustavu tvořenou pouze proporcionálním ventilem a potrubím, s tím, že hladinu v nádobách budeme vnímat pouze jako poruchovou veličinu, můžeme k pozorovanému systému přistupovat jako k lineárnímu. To by značilo, že hladina prvního zásobníku bude čerpadlem udržována na 100% a další dva zásobníky budou představovat poruchu na soustavu. Nebo zanedbáme nelinearitu danou odtokem a budeme všechny nádoby vnímat jako poruchu. V praxi to regulátor nepozná a jde čistě jen o úhel pohledu, se kterým chceme na řízení nahlížet. Tímto krokem se eliminuje závislost rychlosti odtoku z nádrže na výšce hladiny, ale z druhé strany se s použitím čerpadla změní veškeré fyzikální poměry, které byly v platnosti dříve. To vše může vést k nepředvídatelným výchylkám v měření aktuálního průtoku.

Obrázek 5.7 pak dokumentuje měření, kdy bylo po celý čas měření zapnuto čerpadlo do první nádoby. Jak je patrné, nelinearita objemového průtoku je odstraněna a my jsme schopni o modelu prohlásit, že je lineární. Pokud by tomu pak nebylo a my počítali s nelineárním modelem, nebylo by možné výsledný přenos stanovit, jelikož by byl přenos tohoto systému v každém bodě jiný.

Ve světle výše zmíněných přístupů k řízení mixovacího pracoviště je možno říci, že existuje několik náhledů, se kterými můžeme pracovat, nicméně z hlediska teorie řízení je důležité specifikovat úlohy jednotlivých prvků tvořící soustavu. To má pak zcela zásadní vliv na určení přechodové charakteristiky soustavy a ipso facto na návrh regulátoru. V práci je tedy dále zohledňován druhý uvedený náhled na řízení, kdy zanedbáme nelinearitu odtoku.



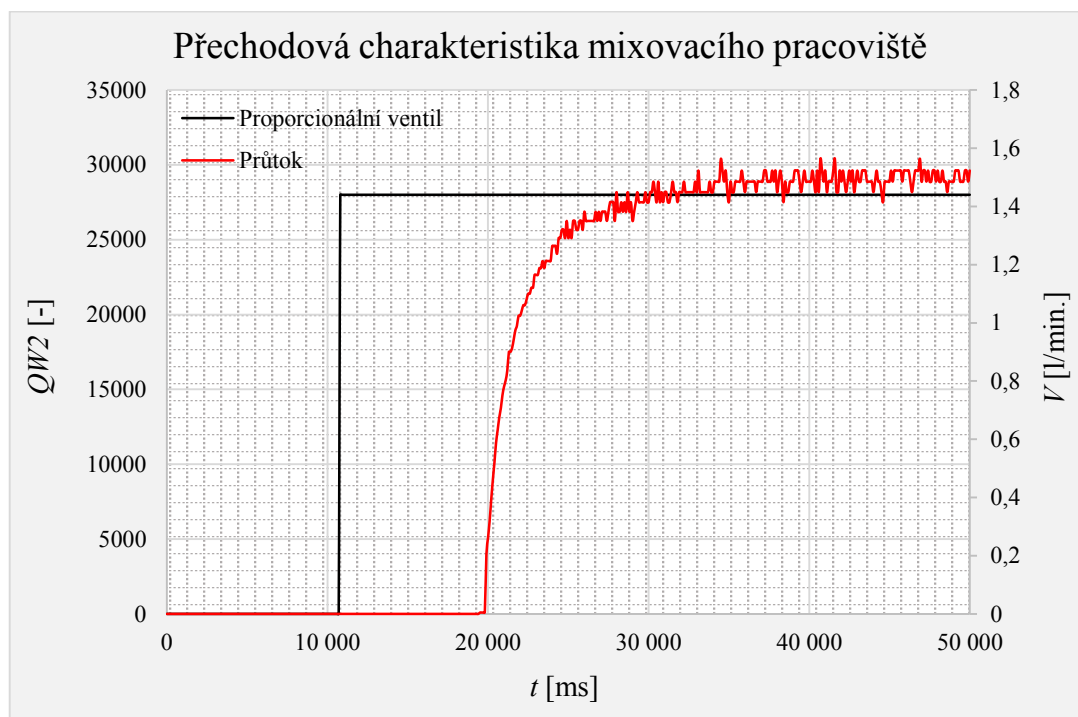
Obrázek 5.7: Přejchodová charakteristika mixovacího pracoviště v delším časovém horizontu

To vše, co bylo výše uvedeno, nám poskytuje dobrý základ pro to, abychom mohli mixovací pracoviště správně identifikovat. Necht' je proto přechodová charakteristika odezva na jednotkový skok realizovaný otevřením proporcionálního ventilu na maximální hodnotu, přičemž budeme sledovat průběh objemového průtoku v čase.

Poté můžeme z obrázku 5.8 určit klíčové parametry přenosu. Prvně jsme schopni identifikovat dopravní zpoždění vlivem nelinearity proporcionálního ventilu, která plyne ze statické charakteristiky (obrázek 5.5). Toto dopravní zpoždění činí 9 s. Dále můžeme pozorovat známý exponenciální náběh odpovídající přenosům prvního řádu, kdy můžeme časovou konstantu přenosu určit jako 63 % z ustálené hodnoty. Tomu odpovídá časová konstanta $T = 1,8$ s. Posledním parametrem chybějícím k určení přenosu je zesílení. To získáme tak, že ustálenou hodnotu podělíme hodnotou napětí při maximálním otevření ventilu, což je 10 V. Zesílení pak vychází $K = 0,15$.

Výsledný přenos mixovacího pracoviště pak můžeme psát jako:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot e^{-\tau s} = \frac{0,15}{1,8s + 1} \cdot e^{-9s}$$



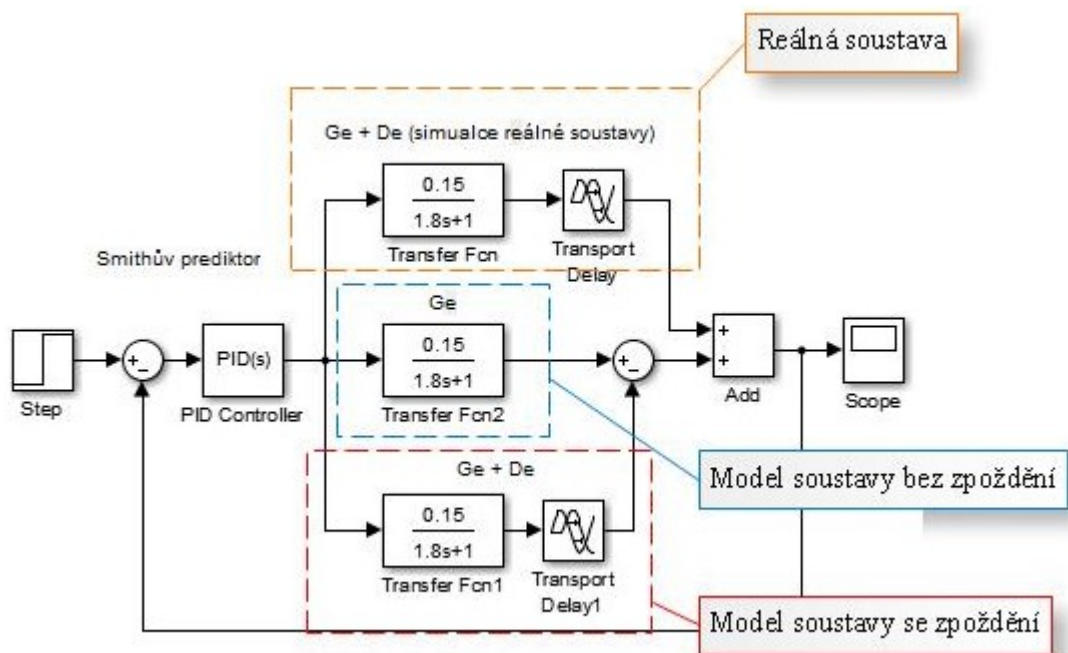
Obrázek 5.8: Přechodová charakteristika mixovacího pracoviště

5.2.1 Návrh regulátoru pro mixovací pracoviště

Při návrhu regulátoru pro mixovací pracoviště je potřeba vzít v úvahu to, že systém vykazuje dopravní zpoždění. To znamená, že nelze použít klasických metod pro návrh regulátoru, ale je potřeba využít metodu vhodnou pro návrh regulátoru pro systémy s dopravním zpožděním.

Nabízí se využít metodu, která využívá zařazení tzv. Smithova prediktoru pro eliminaci dopravního zpoždění. Principem této metody je rozložení pozorované soustavy na dvě části – na soustavu bez zpoždění a samotné zpoždění. Ačkoli je na reálné soustavě měřitelná veličina pouze se zpožděním, je možné díky sestavenému modelu opatřeného Smithovým prediktorem odhadnout hodnotu výstupní veličiny nezatíženou dopravním zpožděním.

Z toho plyne, že samotný regulátor může být navržen mnohem přesněji, jelikož se navrhuje pro soustavu bez zpoždění. Tento fakt lze pozorovat i z obrázku 5.9, který ukazuje modelování mixovacího pracoviště jako soustavy v Simulinku.

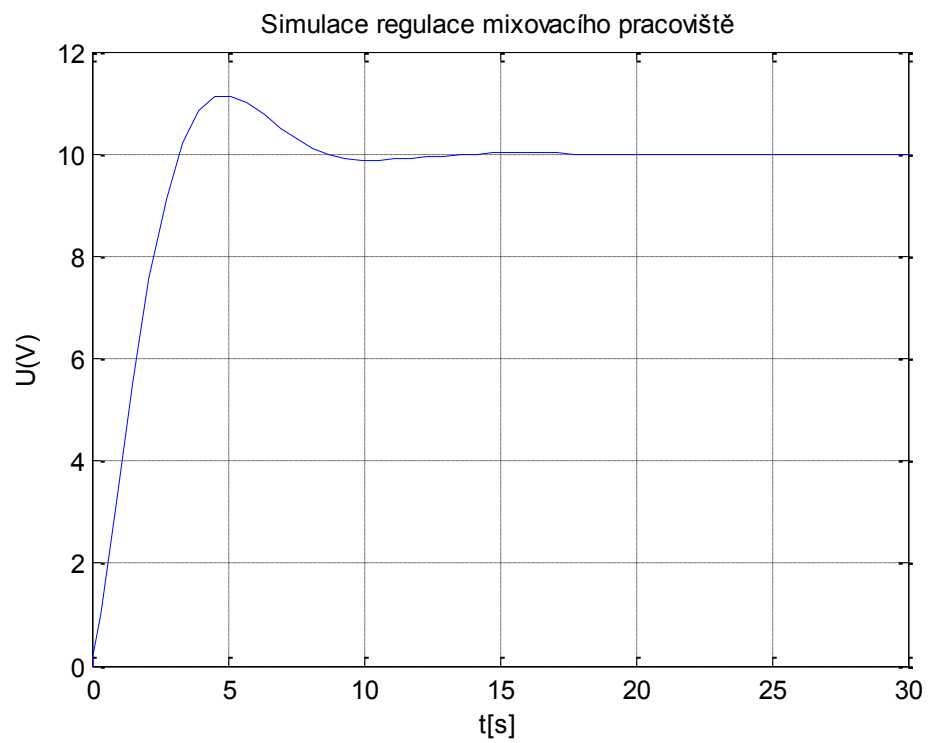


Obrázek 5.9: Model mixovacího pracoviště se zařazením Smithova prediktoru

Poté již je možné navrhnout regulátor pro soustavu bez zpoždění, například pomocí funkce `pidentune`, která je integrovaná v Matlabu. Obdržíme pak přenos PI regulátoru ve tvaru:

$$G_R(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} = 3,15 + 5,94 \cdot \frac{1}{s}$$

Což můžeme ihned aplikovat a zadat tyto parametry do bloku PID regulátoru v Simulinku, přičemž výstup regulované soustavy je možno sledovat na obrázku 5.10. Zde vidíme, že pro vyregulování soustavy je dostatečné použití PI regulátoru. Poznamenejme však, že se jedná o simulaci, v níž nelze zohlednit zásadní věci jako je nelinearita proporcionálního ventilu a proměnné fyzikální poměry způsobené konstrukčním uspořádáním modelu. To vše bude dále rozebráno v kapitolách popisujících reálnou regulaci mixovacího pracoviště.



Obrázek 5.10: Simulace regulace mixovacího pracoviště v Matlabu

6 Návrh algoritmů řízení v TIA Portal

6.1 HW konfigurace a seznam I/O signálů

K řízení všech výše uvedených procesních úloh bylo použito PLC ve stejné hardwarové konfiguraci, jež je uvedena níže. Seznamy vstupních a výstupních signálů se pak různí dle úloh.

6.1.1 HW konfigurace PLC

Slot	Modul	Sériové číslo modulu	Firmware	I adresa	Q adresa
0	PS 25W 24V DC	6ES7505-0KA00-0AB0	V1.0		
1	CPU 1511-1 PN	6ES7511-1AK00-0AB0	V1.1		
2	CP 1543-1	6GK7 543-1AX00-0XE0	V1.1		
3	DI 16x24VDC HF	6ES7521-1BH00-0AB0	V1.0	0...1	
4	DQ 16x24VDC/0.5A ST	6ES7522-1BH00-0AB0	V1.0		0...1
5	AI 8xU/I/RTD/TC ST	6ES7531-7KF00-0AB0	V1.0	2...17	
6	AQ 4xU/I ST	6ES7532-5HD00-0AB0	V1.0		2...9

Tabulka 6.1: Hardwarová konfigurace PLC

Jak lze vidět z výše uvedené tabulky, hardwarová konfigurace PLC sestává se 24 V zdroje umístěného na nulté pozici konfigurace, samotného CPU programovatelného automatu s verzí firmwaru 1.1 na první pozici, komunikačního modulu poskytující ethernetové rozhraní na druhé pozici a signálových vstupně výstupních modulů pro digitální a analogové signály na třetí až šesté pozici konfigurace.

6.1.2 Seznam I/O signálů reakčního pracoviště

Název	I/O	Rozsah	Fyzikální rozsah	Komentář
Digitální vstupy				
B 5	I0.0	BOOL	24V DC	Čidlo minimální hladiny
Digitální výstupy				
Y 0	Q0.0	BOOL	24V DC	Topné těleso
Y CH	Q0.1	BOOL	24V DC	Chlazení
Y M	Q0.2	BOOL	24V DC	Mixování
Analogové vstupy				
B 1	IW2	WORD	4 – 20 mA	Snímač teploty 1
B 2	IW6	WORD	4 – 20 mA	Snímač teploty 2
B 3	IW10	WORD	4 – 20 mA	Snímač teploty 2
B 4	IW14	WORD	4 – 20 mA	Snímač teploty 3

Tabulka 6.2: Seznam I/O signálů reakčního pracoviště

Všechny vstupy a výstupy uvedené ve výše uvedené tabulce jsou vnímány z pohledu PLC, tedy to co je z pohledu PLC vstup bude z pohledu úlohy výstup a naopak.

Diskrétním prvkům soustavy odpovídají signály s fyzikálním rozsahem stejnosměrného napětí o hodnotě 24 V. Detailní informace o signálech na svorkovnici reakčního pracoviště jsou uvedeny v [15].

Analogové vstupy jsou zapojeny na AI modulu v proudovém dvou vodičovém režimu. Konkrétně jsou použity kanály CH0, CH1, CH4, CH5. Schéma zapojení AI modulu pro proudový dvou vodičový režim a další informace jsou uvedeny v kapitole *Wiring* v [18]. Fyzikální rozsah tohoto zapojení pak odpovídá 4 - 20 mA.

6.1.3 Seznam I/O signálů mixovacího pracoviště

Název	I/O	Rozsah	Fyzikální rozsah	Komentář
Digitální vstupy				
B1	I0.0	BOOL	24V DC	Plovákové čidlo – 100% hladiny mixovací nádrže
B2	I0.1	BOOL	24V DC	Průtokoměr – frekvenční výstup
B3 Q1	I0.2	BOOL	24V DC	Ultrazvukový snímač – 100% hladiny 1. nádoby
B4 Q1	I0.5	BOOL	24V DC	Ultrazvukový snímač – 100% hladiny 2. nádoby
B5 Q1	I0.6	BOOL	24V DC	Ultrazvukový snímač – 100% hladiny 3. nádoby
Digitální výstupy				
B3 S/C	Q0.0	BOOL	24V DC	Ultrazvukový snímač – synchronizace a multiplexování
B4 S/C	Q0.1	BOOL	24V DC	Ultrazvukový snímač – synchronizace a multiplexování
B5 S/C	Q0.2	BOOL	24V DC	Ultrazvukový snímač – synchronizace a multiplexování
Y1	Q0.3	BOOL	24V DC	Čerpadlový ventil – PHV4
Y2	Q0.4	BOOL	24V DC	Ventil 1. nádoby – PHV1
Y3	Q0.5	BOOL	24V DC	Ventil 2. nádoby – PHV2
Y4	Q0.6	BOOL	24V DC	Ventil 3. nádoby – PHV3
Y5	Q0.7	BOOL	24V DC	Čerpadlo
Analogové vstupy				
B3 QA	IW2	WORD	0 – 10 V	Ultrazvukový snímač – 1. nádoba
B4 QA	IW4	WORD	0 – 10 V	Ultrazvukový snímač – 2. nádoba
B5 QA	IW6	WORD	0 – 10 V	Ultrazvukový snímač – 3. nádoba
Analogové výstupy				
Y6	QW2	WORD	0 – 10 V	Proporcionální ventil

Tabulka 6.3: Seznam I/O signálů mixovacího pracoviště

Všechny signály jsou uvedeny v [16]. Výše uvedená tabulky uvádí pouze souhrn signálů užitých pro řízení mixovacího pracoviště.

Jelikož je fyzikální rozsah všech analogových vstupů mixovacího pracoviště 0 – 10 V bylo potřeba přepojit modul analogových vstupů na napěťový režim uveden v kapitole *Wiring* v [18].

6.1.4 Seznam I/O signálů plnicího pracoviště

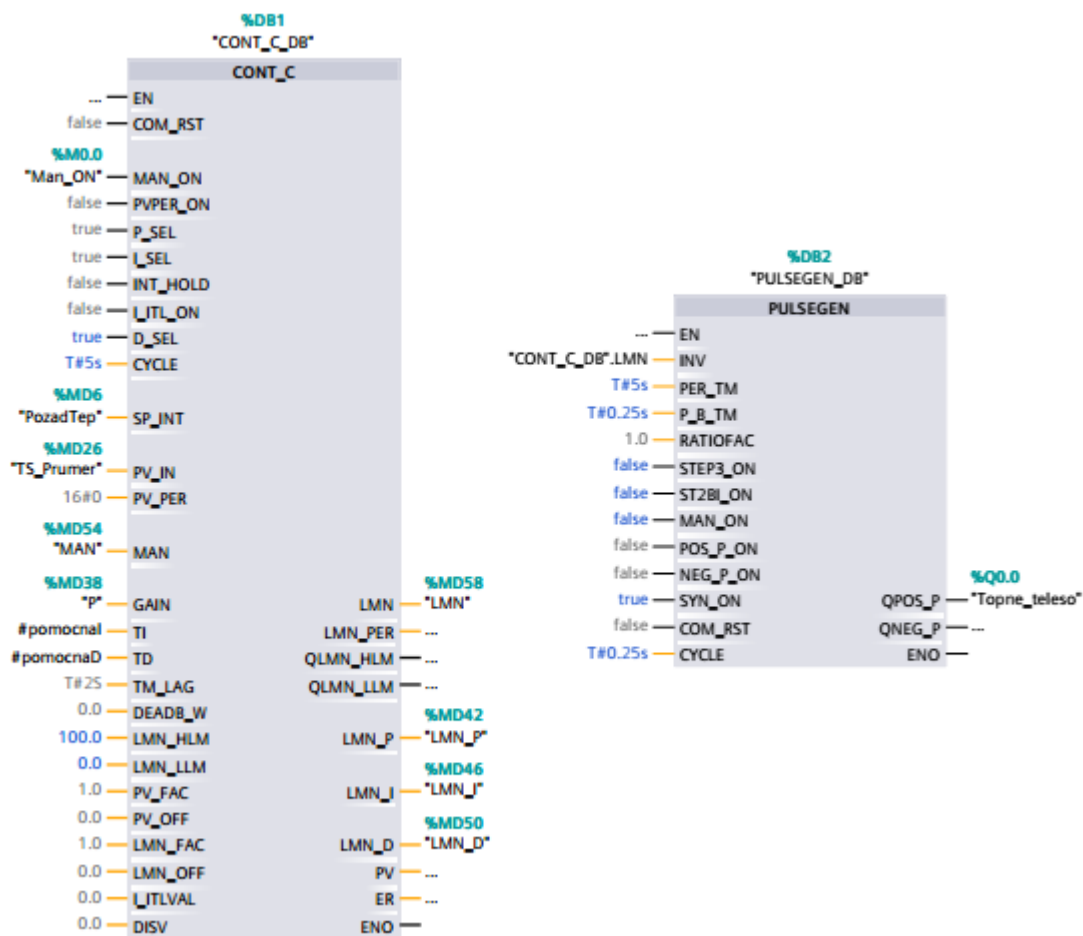
Název	I/O	Rozsah	Fyzikální rozsah	Komentář
Digitální vstupy				
B2	I0.0	BOOL	24V DC	Snímač polohy
B3	I0.1	BOOL	24V DC	Průtokoměr
B4 Q1	I0.2	BOOL	24V DC	Ultrazvuk – 100% hladiny
Digitální výstupy				
Y1	Q0.1	BOOL	24V DC	Ventil napouštění zásobníku
Y2	Q0.2	BOOL	24V DC	Ventil plnění kádinek
Y3	Q0.3	BOOL	24V DC	Čerpadlo napouštění zásobníku
Y4	Q0.4	BOOL	24V DC	Pohon karuselu
B4 S/C	Q0.5	BOOL	24V DC	Ultrazvuk – inicializace displeje
Analogové vstupy				
B4 QA	IW2	WORD	0 – 10 V	Ultrazvuk – analogový vstup

Tabulka 6.4: Seznam I/O signálů plnicího pracoviště

Diskrétní prvky soustavy mají fyzikální rozsah odpovídající stejnosměrnému napětí o hodnotě 24 V. Analogový vstup pak má fyzikální rozsah 0 – 10 V a je připojen na kanál 0 karty analogových vstupů, opět v napěťovém režimu. Detailnější informace o signálech na svorkovnici plnicího pracoviště lze najít v [17].

6.2 Řídicí software reakčního pracoviště

Řízení je realizováno pomocí pulsně-šířkové modulace spínání topného tělesa, které je, jak už bylo uvedeno, schopno pracovat pouze ve dvou polohách – zapnuto, vypnuto. První cyklické přerušení s cyklem 5s je užito pro realizaci PID regulátoru. Konkrétně se jedná o spojitý PID regulátor CONT_C, který vykonává vyhodnocení regulace a jehož výstupem je PULSEGEN, který v návaznosti na vyhodnocený akční zásah stanovený PID regulátorem generuje střidu o hodnotě úměrné vypočtenému akčnímu zásahu v rozmezí 0 až 100%. PULSEGEN má poté vlastní cyklické přerušení s dobou cyklu 250 ms aby byly zajištěny optimální vlastnosti PWM. Jako skutečná hodnota regulované veličiny je do zpětné vazby použita průměrná teplota v nádobě.



Obrázek 6.1: Použití spojitého regulátoru a PWM bloku v TIA Portal

Parametry regulátoru je možno taktéž nastavovat přes vizualizaci, spolu s možností zapnutí manuálního režimu PID regulátoru a stanovením žádané hodnoty regulované veličiny. Výstupem regulátoru je pak celkový akční zásah a jednotlivé akční zásahy P složky, I složky a D složky regulátoru.

Další možnost při realizaci regulace reakčního pracoviště je použití odlišné technologie, kterou Siemens nabízí ve svém vývojovém prostředí a která je zároveň novější. Touto technologií je PID_Compact, který se liší především rozsáhlejšími možnostmi autotuningu konstant regulátoru. Jelikož jsme konstanty regulátoru navrhli sami, v návaznosti na přechodovou charakteristiku systému, není podstatné, kterou technologií při řízení reakčního pracoviště použijeme. Technologie PID_Compact bude použita později, při řízení mixovacího pracoviště.

6.2.1 Tabulka použitých symbolů v PLC

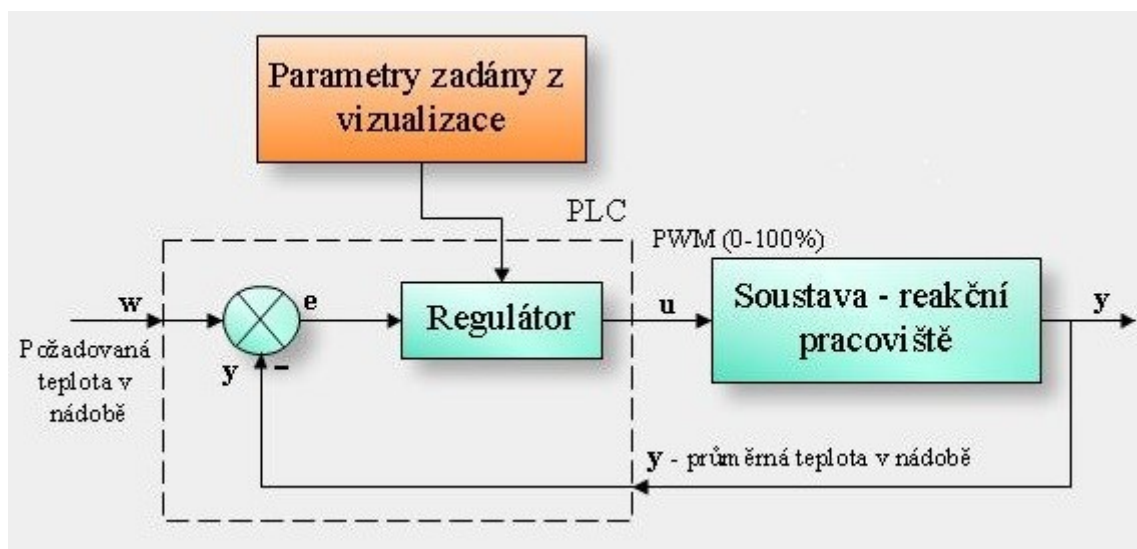
Níže uvedená tabulka shrnuje všechny symboly užívané v rámci programu, včetně uvedení jejich datového typu, adresy nebo vysvětlení významu.

Název	Datový typ	Adresa	Komentář
Topne_teleso	Bool	%Q0.0	
Chlazení	Bool	%Q0.1	
Mixovani	Bool	%Q0.2	
TS1	Word	%IW2	Teplotní snímač 1
TS2	Word	%IW4	Teplotní snímač 2
TS3	Word	%IW10	Teplotní snímač 3
TS4	Word	%IW12	Teplotní snímač 4
PozadTep	Real	%MD6	Požadovaná hodnota teploty
“Teploty_Digit“.TS1_Digit	Real	%DB5.DBD8	Digitální hodnota TS1
“Teploty_Digit“.TS2_Digit	Real	%DB5.DBD12	Digitální hodnota TS2
“Teploty_Digit“.TS3_Digit	Real	%DB5.DBD16	Digitální hodnota TS3
“Teploty_Digit“.TS4_Digit	Real	%DB5.DBD20	Digitální hodnota TS4
TS_Prumer	Real	%MD26	Průměrná teplota v nádobě
I	Real	%MD30	Integrační složka PID
D	Real	%MD34	Derivační složka PID
P	Real	%MD38	Proporcionální složka PID
Man_ON	Bool	%M0.0	Zaplutí manuálního módu PID
LMN_P	Real	%MD42	Akční zásah P složky PID
LMN_I	Real	%MD46	Akční zásah I složky PID
LMN_D	Real	%MD50	Akční zásah D složky PID
MAN	Real	%MD54	Manuální zásah
LMN	Real	%MD58	Celkový akční zásah (střída)

Tabulka 6.5: Tabulka tagů a symbolů použitých v rámci programu reakčního pracoviště

6.2.2 Schéma regulace a význam PWM

Jak už bylo vzpomenuto výše, k regulaci je využito PWM regulace, kdy je spojitý regulátor CONT_C použit v synergii s blokem pulsně-šířkové modulace. Chceme-li být korektní je potřeba zasadit tuto regulaci do kontextu teorie řízení. Pro lepší představu regulace teploty v reakčním pracovišti byl vytvořen obrázek 6.2, ukazující schéma regulačního obvodu vztaženého přímo k regulaci teploty reakčního pracoviště. Obrázek názorně ukazuje všechny důležité veličiny obvodu a poskytuje tak ucelený pohled na regulaci reakčního pracoviště v kontextu teorie řízení.



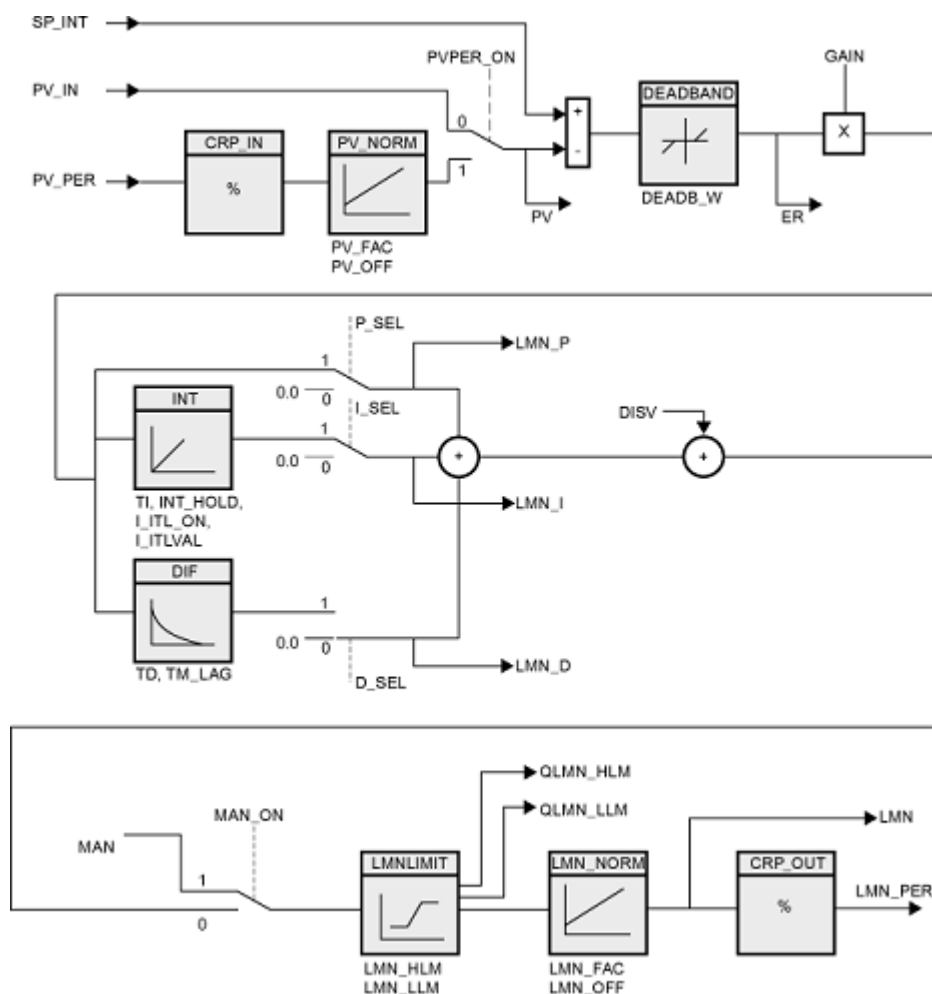
Obrázek 6.2: Schéma regulace reakčního pracoviště

Jsou-li známy parametry obvodu a jeho veličiny pak je vhodné zmínit technologii, která zajišťuje samotné řízení. Touto technologií je spojitý PID regulátor CONT_C, který je zobrazen na obrázku 6.1. Nicméně zde je zobrazen pouze technologický objekt jako celek opatřený vstupy a výstupy. Pro pochopení funkce této technologie je však potřeba pochopit jeho vnitřní strukturu.

Tato vnitřní struktura je zobrazena na obrázku 6.3. Co se týče samotných složek PID regulátoru tak ty jsou zde reprezentovány vstupy GAIN, I_SEL a D_SEL. Jak je z diagramu patrné je možné tyto složky libovolně vypínat a zapínat a tak tvořit různé derivace PID regulátoru. Z pohledu výše uvedeného regulačního obvodu je požadovaná hodnota regulované veličiny neboli řídicí veličina označena jako SP_INT, samotná regulovaná veličina jako PV_IN, regulační odchylka jako ER a akční veličina jako LMN. Popřípadě lze uvažovat poruchovou veličinu v podobě DISV. Jako doplněk lze potom vnímat vnesení hystereze DEADB_W, která způsobí necitlivost vůči malým změnám regulované veličiny.

Co se týče akčního zásahu, ten je dále rozdělen do akčního zásahu P složky (LMN_P), I složky (LMN_I) a D složky (LMN_D). To značí, že můžeme sledovat v reálném čase zásahy jednotlivých složek regulátoru a zároveň celkový akční zásah (LMN). S tím souvisí i omezení akčního zásahu (LMN_HLM a LMN_LLM) a další dílčí funkce, který přizpůsobují akční zásah aktuálním požadavkům.

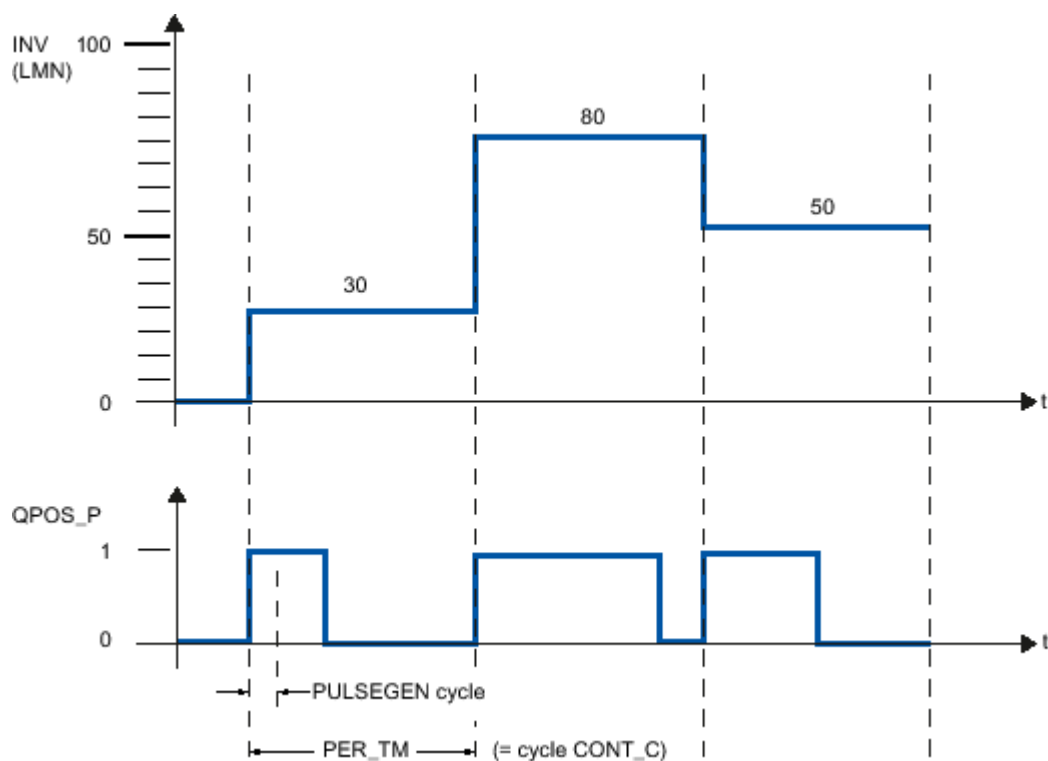
Regulátor pracuje ve dvou režimech – automatickém a manuálním. Z níže uvedeného diagramu je vidět, že pokud je zapnut manuální režim (MAN_ON) nevykonává se řídicí algoritmus, ale je pouze možné provádět manuální akční zásah (MAN).



Obrázek 6.3: Blokové schéma spojitého regulátoru CONT_C [20]

Poslední věcí, která si zaslouží pozornost je realizace pulzně-šířkové modulace pomocí PULSEGENU. Jak už bylo řečeno, slouží jako výstup PID regulátoru, konkrétně realizuje samotný akční zásah na soustavu.

Princip spočívá ve stanovení periody (PER_TM), která v našem případě odpovídá cyklu se kterým je volán regulátor, což je 5 s. V návaznosti na to se stanoví cyklus PULSEGENU (P_B_TM), který je minimálně dvacetkrát menší. To zajistí správnou funkci PWM v návaznosti na cyklické vykonávání instrukce regulátoru. Níže uvedený obrázek 6.4 ukazuje dobu sepnutí v závislosti na velikosti akčního zásahu. To v praxi znamená, že pokud je perioda 5 sekund a akční zásah je stanoven na 30 % střidy, bude topné těleso 1,5 sekundy zapnuto a zbylých 3,5 sekundy vypnuto. Tímto principem je realizována pulzně-šířková modulace použitá při regulaci teploty reakčního pracoviště.



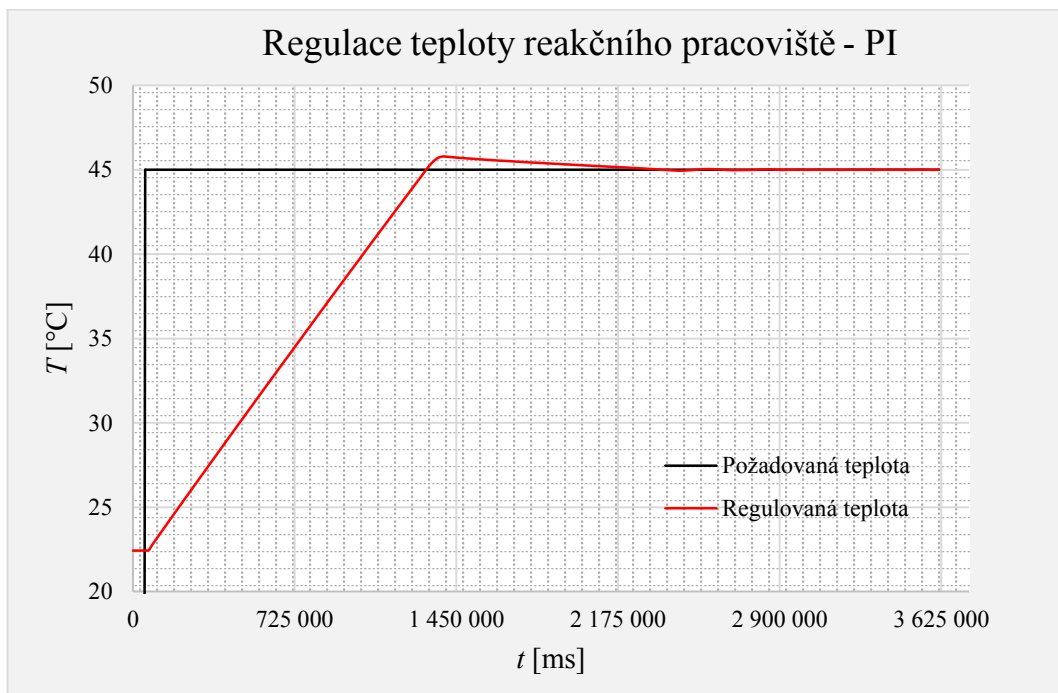
Obrázek 6.4: Princip pulzně-šířkové modulace užitý při regulaci [20]

6.2.3 Měření regulace teploty

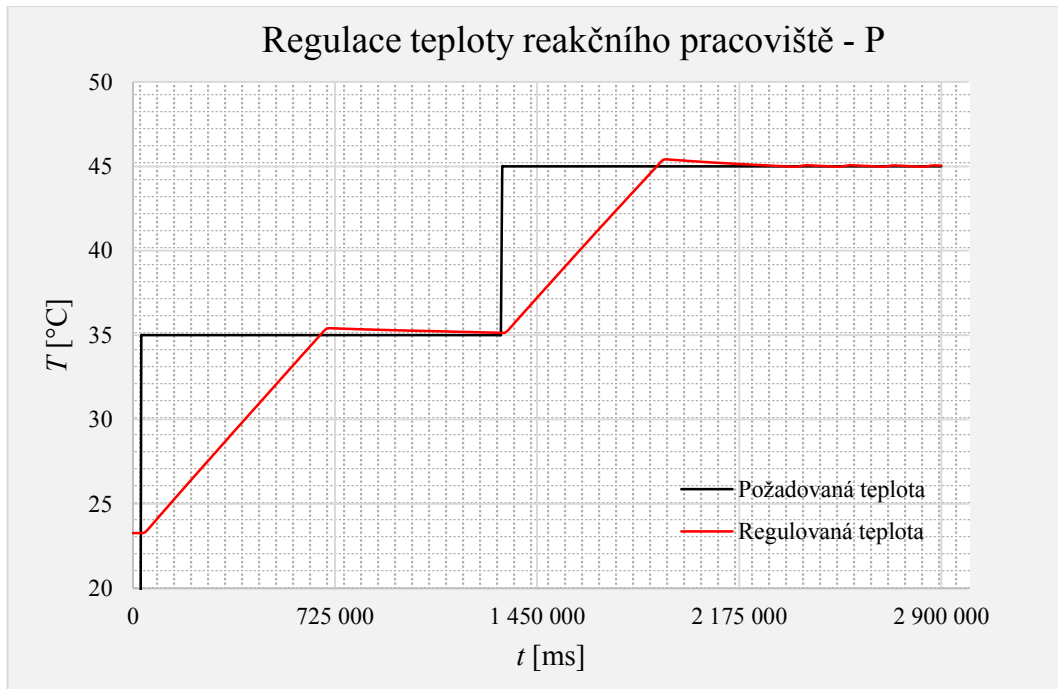
Níže uvedené obrázky ukazují výsledné měření regulace teploty reakčního pracoviště pomocí Traces v TIA Portalu. Výchozí teplota odpovídá pokojové teplotě, přičemž požadovaná teplota byla stanovena na 45°C u první regulace a na 35°C a 45°C u regulace druhé.

Jak můžeme dále vidět z charakteristiky na obrázku 6.5, k ustálení dochází cca po 40 minutách a maximální překmit činí 1,75%. Jelikož se jedná o soustavu, kterou jsme identifikovali jako integrační má použití I složky regulátoru zanedbatelnou úlohu a k odstranění trvalé regulační odchylky dochází bez ohledu na to, zdali bude I složka v regulátoru použita či nebude.

To nás vede k závěru, že z praktického hlediska není podstatné, zdali bude použit PI nebo P regulátor. U obou průběhu můžeme sledovat stejnou dobu náběhu, přibližně stejný překmit a nulovou trvalou regulační odchylku. Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání (omezení akčního zásahu apod.) reakčního pracoviště můžeme výsledky regulace považovat za uspokojivé.



Obrázek 6.5: Regulace teploty reakčního pracoviště – PI regulátor



Obrázek 6.6: Regulace teploty reakčního pracoviště – pouze P regulátor

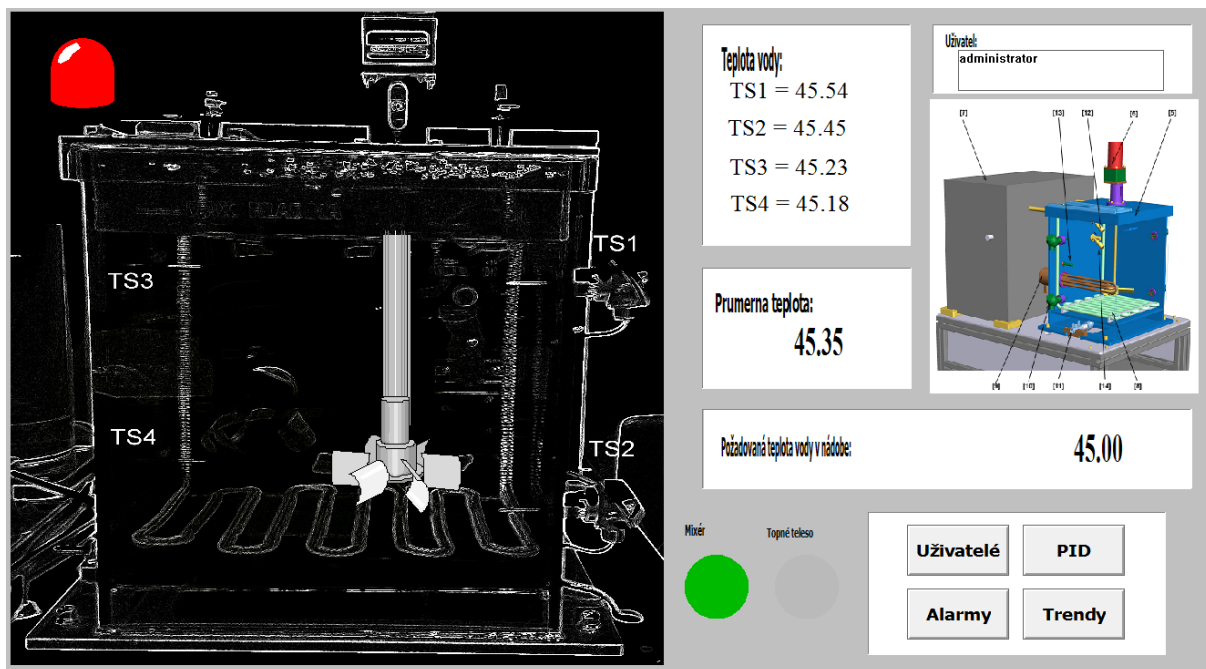
6.3 Vizualizace reakčního pracoviště

Vizualizace procesu regulace teploty reakčního pracoviště je realizována pomocí programu InTouch Wonderware, podobně jako tomu bude i u ostatních dvou pracovišť.

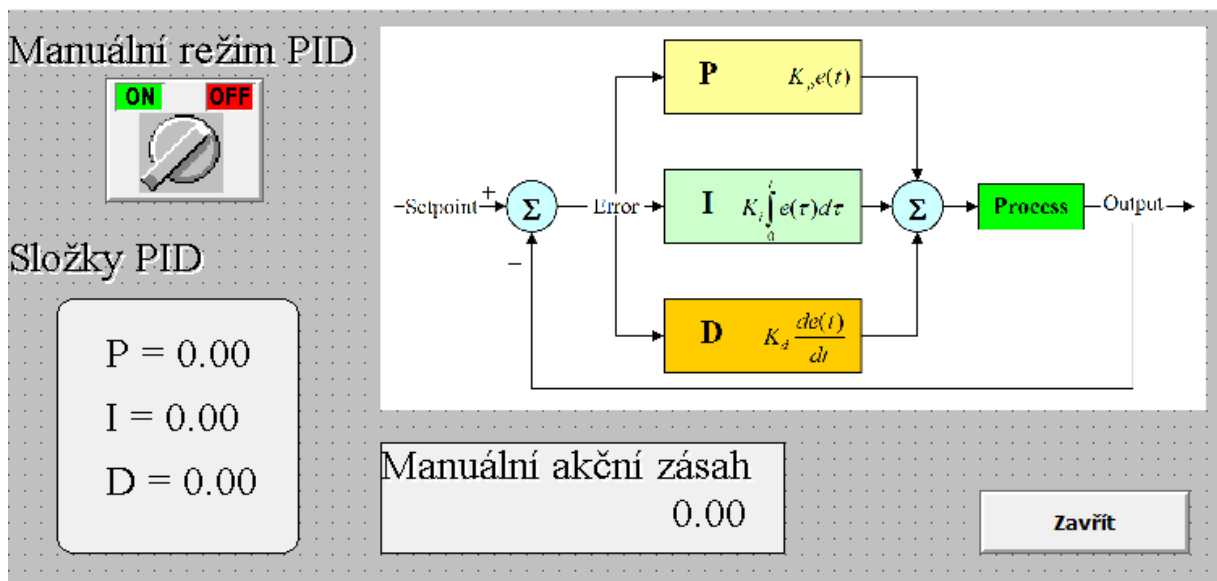
Celá vizualizace je tvořena pěti částmi, které monitorují průběh procesu regulace teploty. Jedná se o okno procesní úlohy, které je výchozím bodem celé vizualizace. Další okna je možno otevřít z okna procesní úlohy. Tyto okna jsou – okno alarmů, okno pro přihlášení uživatele, okno pro nastavení PID regulátoru a okno trendů.

Prvním oknem je okno procesní úlohy zobrazení na obrázku 6.7. Jedná se o výchozí okno, které tvoří základ vizualizace a které poskytuje ucelený pohled na celou regulační úlohu. Jsou zde zobrazeny všechny digitalizované hodnoty teplotních snímačů a také průměrná teplota, podle které probíhá regulace. Je zde také možno zadat požadovanou hodnotu teploty vody v nádobě. Pokud tedy bude tepelné těleso zahřívat vodu, objeví se ve vizualizaci symbol topného tělesa a pokud bude aktivní mixér, bude ve vizualizaci blikat symbol mixéru.

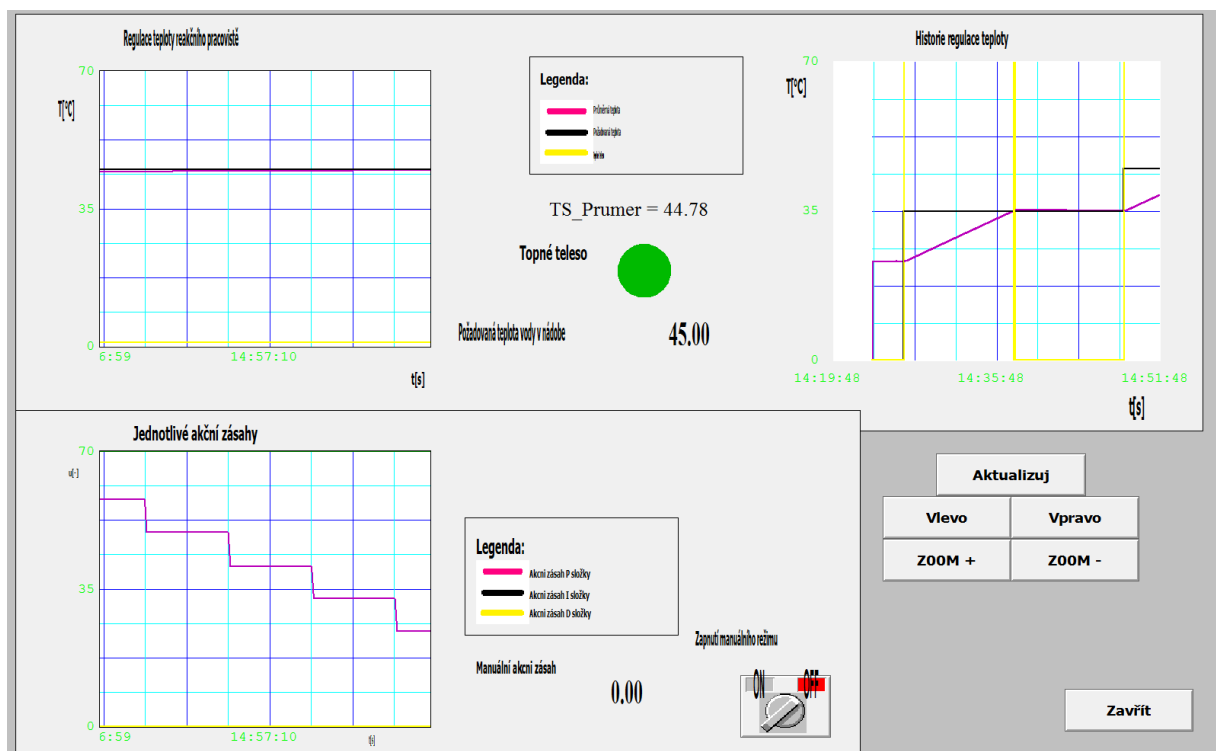
Druhou důležitou částí je okno nastavení PID regulátoru, zobrazené na obrázku 6.8. Toto okno slouží k nastavení parametrů regulátoru dle požadavků obsluhy. Je zde možnost nastavit proporcionální, integrační a derivační složku PID regulátoru realizovaného v TIA Portálu a tak ovlivnit regulační schopnosti systému. Kromě samotného nastavování konstant PID regulátoru je zde i přepínač mezi automatickým a manuálním režimem a manuální akční zásah. Pokud je ve vizualizaci přihlášen operátor nemá možnost nastavovat parametry PID a tedy ovlivňovat regulační schopnosti soustavy.



Obrázek 6.7: Okno procesní úlohy reakčního pracoviště



Obrázek 6.8: Okno pro nastavení PID regulátoru reakčního pracoviště



Obrázek 6.9: Okno pro zobrazení trendů reakčního pracoviště

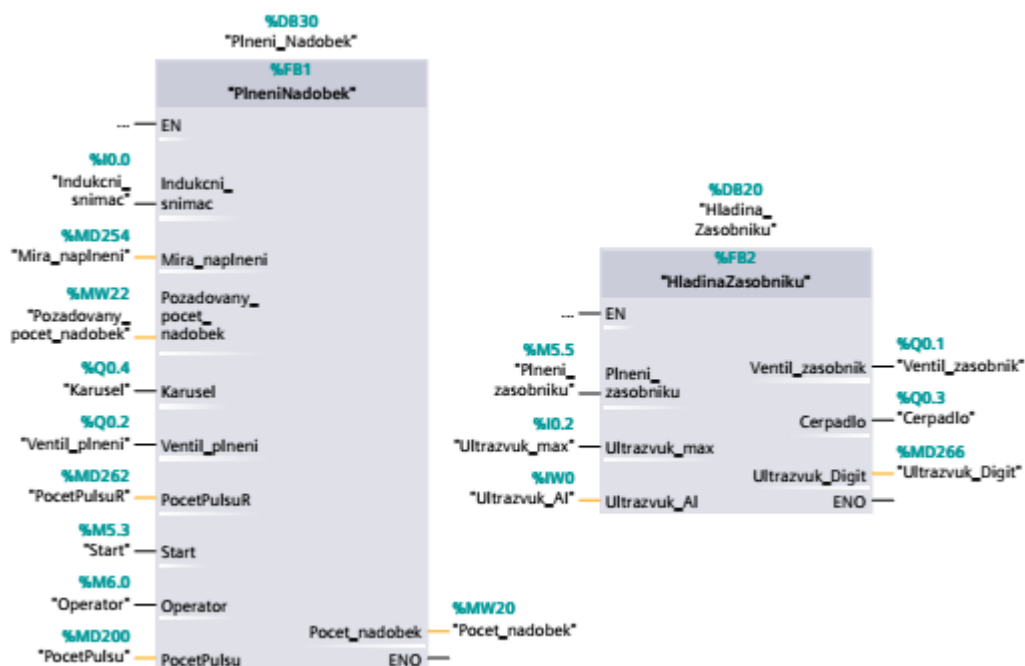
Třetím oknem je okno trendů, které lze vidět na obrázku 6.9. Toto okno zobrazuje dva reálné, historický trend a další prvky, které jsou užitečné při regulaci teploty (zapínání manuálního režimu, manuální akční zásah, požadovaná teplota, průměrná teplota, indikace stavu topného tělesa apod.). První reálný trend popisuje regulaci teploty pracoviště. Tento trend zobrazuje tři průběhy – průměrnou teplotu, požadovanou teplotu a topné těleso. Druhý reálný trend zobrazuje jednotlivé akční zásahy. Jednotlivě jsou zobrazeny zásahy složky proporcionální, integrační, derivační a výsledného akčního zásahu. Historický trend potom ukládá zobrazena data z prvního reálného trendu zobrazujícího regulaci teploty v čase.

Poté je ještě ve vizualizaci okno alarmů a okno pro přihlášení uživatele. Okno alarmů spustí alarm, pokud teplota přesáhne určitou hodnotu. Jelikož je ale v reakčním pracovišti bezpečnostní termostát není nezbytně nutné tuto funkci využívat. Okno pro přihlášení uživatele umožňuje rozvrhnout pravomoce obsluhy a omezit možnosti zásahu do regulace nepovolaným osobám.

6.4 Řídicí software plnicího pracoviště

Plnicí pracoviště jako celek, jak už bylo poznamenáno dříve, není soustava uzpůsobená na jakoukoli regulaci. Jedná se o čistě sekvenční úlohu, která představuje model průmyslové plnicí linky. Samotné řízení je rozděleno do dvou logických částí, kdy každá část je reprezentována funkčním blokem. První funkční blok slouží k ovládání čerpání vody do zásobníků a zobrazování aktuálního stavu naplnění nádrže. Druhý funkční blok poté obsahuje logiku řízení samotného plnění nádobek, včetně možností uživatele nastavovat počet naplněných nádobek a míru naplnění nádobek.

Základní informace, se kterou program pracuje, je počet pulzů průtokoměru. Tento průtokoměr vrací pulzy o frekvenci 0 - 505 Hz. Pomocí hardwarového přerušení implementovaného v programu je možno snímat pulzy dostatečně přesně, i když není použit vysokofrekvenční čítač. Nicméně je potřeba nastavit vstupní zpoždění při detekci náběžné hrany této OB40 na kartě digitálních vstupů na co nejnížší hodnotu, což je 0.05 ms. Toto hardwarové přerušení OB40 poté obsahuje pouze jednoduchý program, který inkrementuje hodnotu pulzů a ukládá číslo do paměťové proměnné, aby bylo možno s touto proměnnou dále pracovat.



Obrázek 6.10: Použití dvou funkčních bloků při řízení plnicího pracoviště

6.4.1 Tabulka použitých symbolů v PLC

Níže uvedená tabulka shrnuje všechny symboly užívané v rámci programu pro plnicí pracoviště, včetně uvedení jejich datového typu, adresy nebo vysvětlení významu.

Název	Datový typ	Adresa	Komentář
Indukcni_snimac	Bool	%I0.0	Indukční snímač karuselu
Prutokomer	Bool	%I0.1	Průtokoměr - frekvenční
Ultrazvuk_max	Bool	%I0.2	100 % hladiny zásobníku
Ultrazvuk_AI	Word	%IW2	Analogový výstup ultrazvuku
Ventil_zasobnik	Bool	%Q0.1	Ventil pro napouštění zásobníku
Ventil_plneni	Bool	%Q0.2	Ventil pro plnění kádinek
Cerpadlo	Bool	%Q0.3	Čerpadlo zásobníku
Karusel	Bool	%Q0.4	Pohon karuselu
Start	Bool	%M5.3	Spuštění procesu plnění
Plneni_zasobniku	Bool	%M5.5	Zahájení plnění zásobníku
Operator	Bool	%M6.0	Potvrzení operátora
Pocet_nadobek	Int	%MW20	Počet naplněných nádobek
Pozadovany_pocet_nadobek	Int	%MW22	Počet nádobek, které mají být naplněny
PocetPulsu	DWord	%MD200	Počet pulzů průtokoměru – OB40
PocetPulsuR	Real	%MD262	Počet pulzů ve formátu Real

Mira_naplneni	Real	%MD254	Požadované naplnění – 30 – 150 ml
Ultrazvuk_Digit	Real	%MD266	Hladina zásobníku (0-100%)

Tabulka 6.6: Tabulka tagů a symbolů použitých v rámci programu plnicího pracoviště

6.4.2 Měření průběhu plnění kádinek

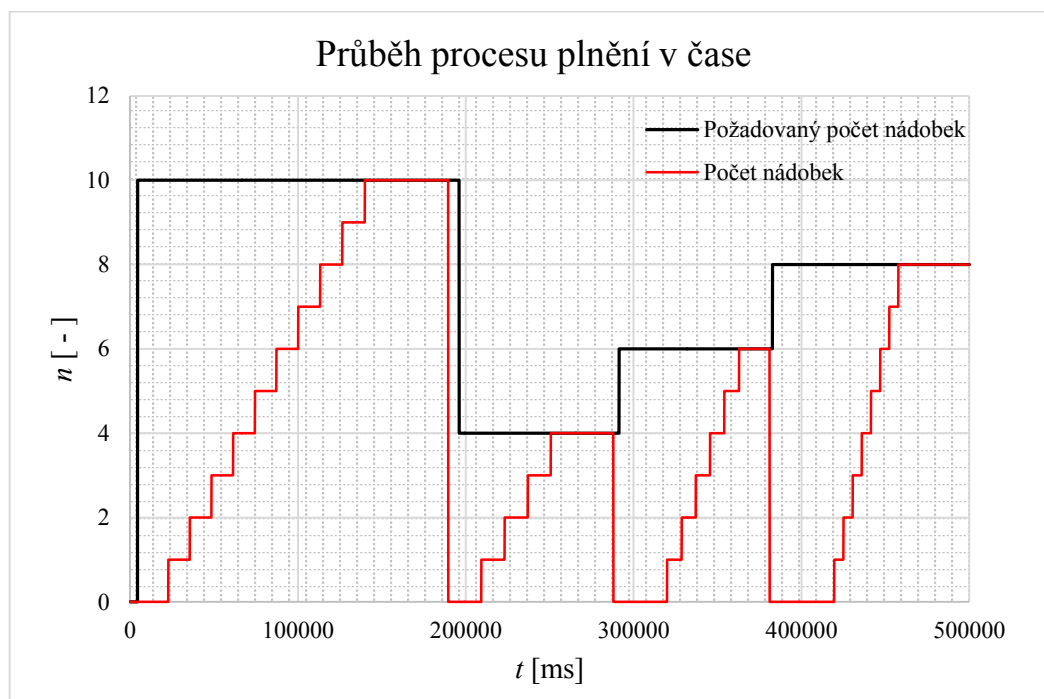
Ačkoli, jak už bylo výše uvedeno, se nejedná o regulační úlohu ale o sekvenční proces je pro názornost vhodné vizualizovat výsledky průběhu této sekvenční úlohy v čase. Obrázek 6.11 tedy zobrazuje plnění kádinek v čase.

Pro přehlednost grafu je nutno poznamenat několik souvislostí, které provázejí celý proces plnění a které nejsou z grafu na první pohled patrné. V grafu jsou zobrazeny čtyři nezávislé procesy plnění s tím, že každý zobrazený proces plnění má odlišné parametry, které jsou zadávány prostřednictvím vizualizace. Tyto parametry jsou patrné z obrázku 6.12 jež je součástí podkapitoly popisující vizualizaci plnicího pracoviště.

V prvním procesu plnění byl nastaven požadovaný počet nádobek na hodnotu 10 s tím, že míra naplnění byla stanovena na 150 ml, tedy na maximální hodnotu naplnění nádoby. Je tedy i z grafu patrné, že doba plnění nádobek je regulérně nejdelší ze všech měřených plnicích procesů.

V druhém procesu byl nastaven požadovaný počet nádobek na hodnotu 4 a míra naplnění opět na 150 ml. Zde je vidět, že celková doba plnění je logicky menší, nicméně doba mezi jednotlivými plněními je zachována vlivem požadovaného naplnění, které zůstalo stejné.

Třetí a čtvrtý proces ukazuje plnění 6 a 8 nádobek, kdy ve třetím plnění byla míra naplnění 75 ml (polovina nádoby) a ve čtvrtém 30 ml (minimální hodnota naplnění). Opět můžeme sledovat vliv počtu nádobek a míry naplnění na vývoj procesu v čase.



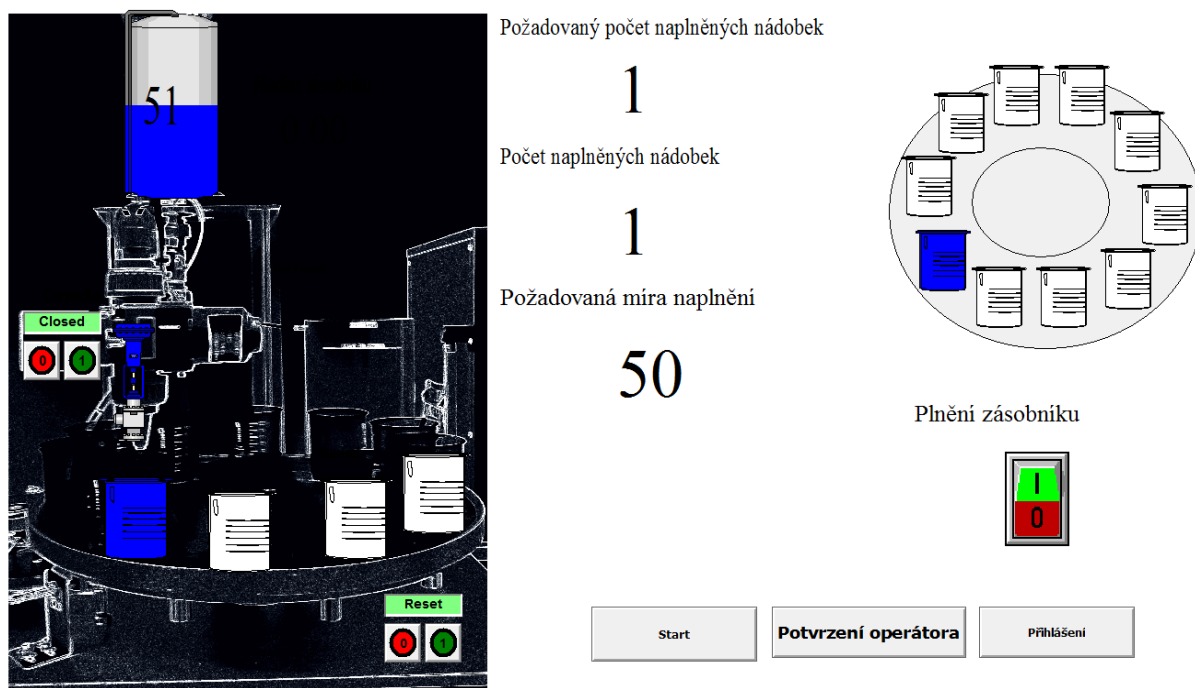
Obrázek 6.11: Průběh plnění kádinek plnicího pracoviště

6.5 Vizualizace plnicího pracoviště

Vizualizace plnicího pracoviště je realizována pomocí dvou oken, přičemž jedno okno je okno samotné procesní úlohy a druhé okno slouží k přihlašování uživatelů. Opět, jako v předešlém případě je komunikace mezi vizualizací a TIA Portalem realizovaná pomocí KEPServeruEX.

Hlavní, výchozí okno procesní úlohy poté skýtá jednoduchou vizualizaci plnicího pracoviště, která umožňuje nastavit všechny klíčové parametry procesu. Těmito parametry jsou počet nádobek, které mají být naplněny a míra jejich naplnění. Vizualizace také ukazuje míru naplnění plnicího zásobníku a aktuální počet naplněných nádobek. Poslední funkcí je plnění zásobníku, které slouží k přečerpávání vody z dolního zásobníku do plnicí nádrže.

Významnými prvky jsou tlačítka start a potvrzení operátora. Tlačítkem start je započat celý proces, přičemž je nutné po doběhnutí procesu potvrzení operátorem, aby bylo možné proces opakovat. To zajistí, aby nemohlo být plněno do již naplněné nádoby nebo aby bylo naplněno více nádobek než bylo požadováno. Potvrzení operátora tedy slouží jako informace od uživatele, že jsou nádoby vyprázdněny a že je možno proces opakovat.



Obrázek 6.12: Okno procesní úlohy plnicího pracoviště

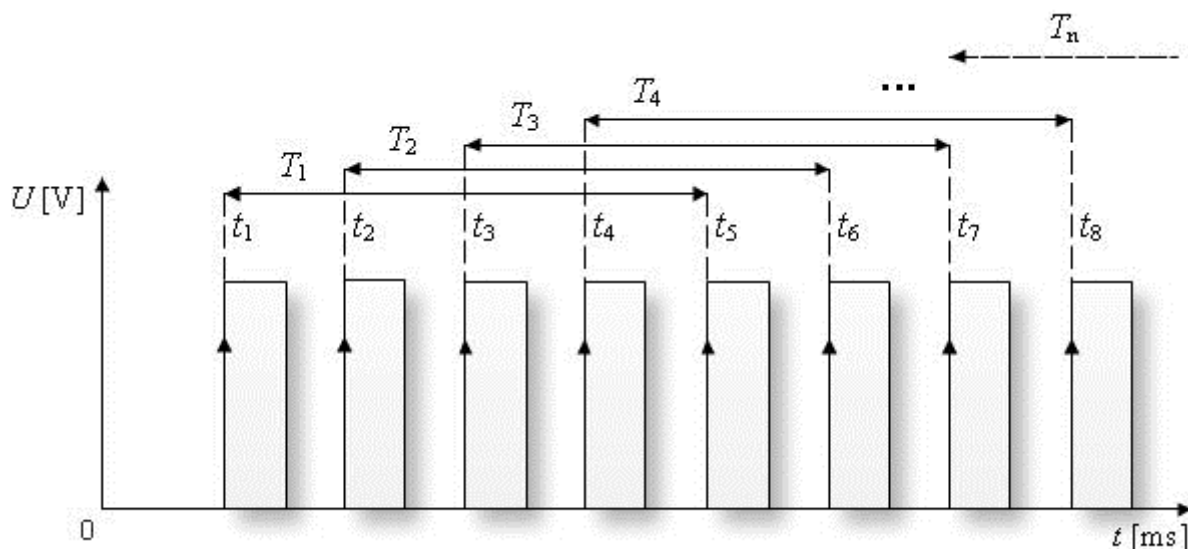
6.6 Řídicí software mixovacího pracoviště

Při realizaci regulace na konstantní průtok je zřejmé, že abychom mohli zavádět do zpětné vazby regulátoru aktuální hodnotu průtoku je potřeba ho určitým způsobem měřit. K tomu je na potrubí soustavy průtokoměr, jehož výstupem jsou pulzy o určité frekvenci dané aktuálním objemovým průtokem. Snímání této frekvence je doporučeno pomocí modulu vysokofrekvenčního čítače. Tento čítač ovšem není součástí hardwarové konfigurace PLC, které je užito pro řízení a tedy nelze tuto metodu použít. Také si nevystačíme s pouhou inkrementací pulzů, jako tomu bylo u pracoviště plnicího, jelikož by to nevedlo k žádnému smysluplnému závěru.

Nabízejí se tedy dva náhledy na snímání průtoku. Buďto průtok snímat z hlediska frekvence nebo z hlediska periody pulzů. Z hlediska frekvence je myšlena metoda, kdy je každé dvě sekundy (pomocí OB30) přečtena hodnota paměťové proměnné, jenž inkrementuje pulzy (OB40). To značí, že dostáváme informaci o průtoku každé dvě sekundy a to ještě se značnou chybou jelikož maximální dosažitelný počet pulzů v tomto časovém intervalu je cca 125 pulzů. Každopádně podíváme-li se na dynamiku soustavy (obrázek 5.8), vidíme, že náběh průtoku je značně rychlý, jelikož časová konstanta je 1,8 s. To značí, že časový interval dvou sekund je příliš velký a měření touto metodou by bylo nepřesné.

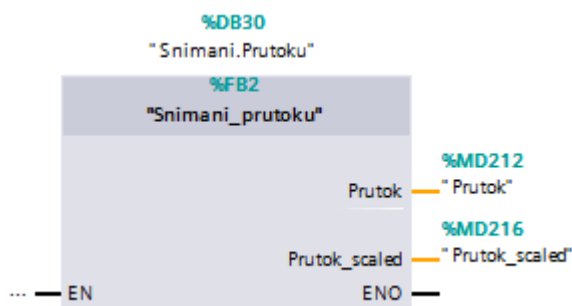
Využijeme-li ale metodu snímání průtoku z hlediska periody obdržíme výrazně přesnější měření, které nebude zatíženo chybou danou pomalým měřením. Měření průtoku z hlediska periody pulzů

spočívá v tom, že každá náběžná hrana pulzu generuje systémový čas, přičemž se tyto časy ukládají do paměťových proměnných. Následně je stanovena výsledná perioda, která je dána rozdílem času mezi první a pátou náběžnou hranou pulzů (viz obrázek 6.13). Tato perioda je následně v PLC přepočítána na frekvenci a frekvence poté na aktuální průtok, který je možno zavést do zpětné vazby regulátoru.



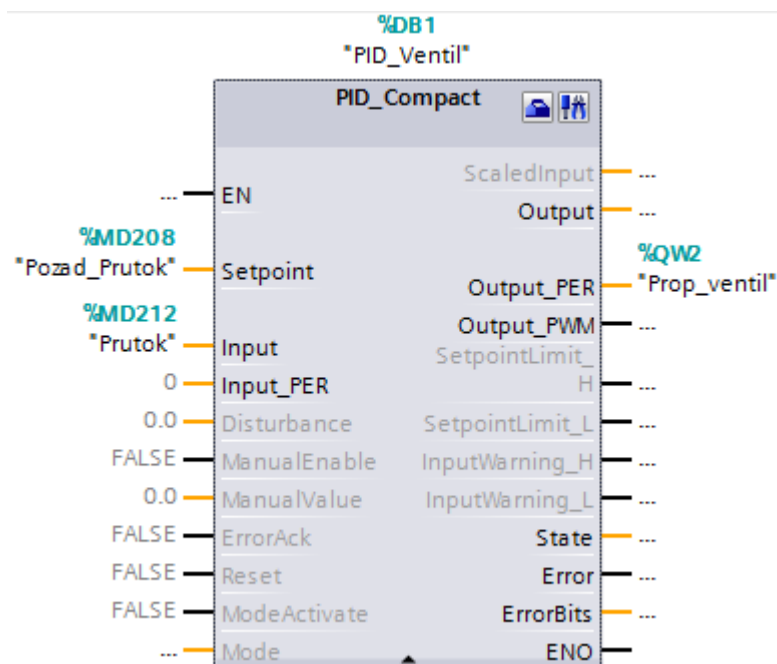
Obrázek 6.13: Princip snímání průtoku z hlediska periody pulsů průtokoměru

Celá logika výpočtu aktuálního průtoku je implementována do funkčního bloku, který je volán s hardwarovým přerušením OB40. Toto hardwarové přerušení je potom aktivováno náběžnou hranou signálu z průtokoměru.



Obrázek 6.14: Funkční blok pro snímání průtoku umístěný v OB40

Pokud již máme zpětnou vazbu tvořenou aktuálním průtokem, je možné implementovat regulátor, který je tvořen blokem PID_Compact. Tento blok poskytuje podobné možnosti řízení jako blok CONT_C, který byl použit pro realizaci regulátoru pro reakční pracoviště. Jedná se pouze o novější technologii spojitého PID regulátoru s obsáhlejšími možnostmi autotuningu a konfigurace.



Obrázek 6.15: Použití spojitého regulátoru PID_Compact v TIA Portal

6.6.1 Tabulka použitých symbolu v PLC

Níže uvedená tabulka shrnuje všechny symboly užívané v rámci programu pro plnicí pracoviště, včetně uvedení jejich datového typu, adresy a vysvětlení významu.

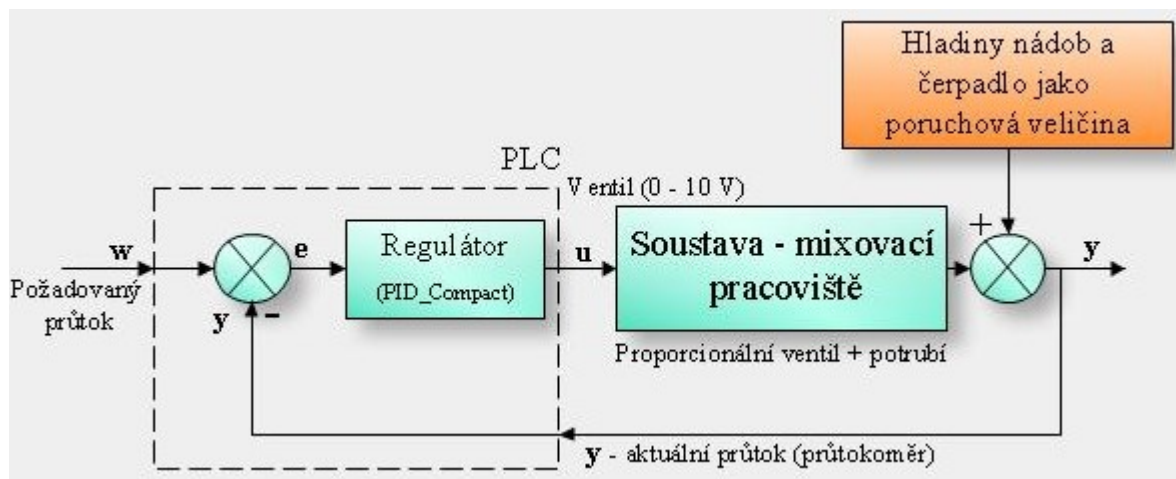
Název	Datový typ	Adresa	Komentář
Prtokomer	Bool	%I0.1	Frekvenční výstup
Prvni_zasobnik_MAX	Bool	%I0.1	100 % hladiny prvního zásobníku
Druhy_zasobnik_MAX	Bool	%I0.5	100 % hladiny druhého zásobníku
Druhy_zasobnik_MAX	Bool	%I0.6	100 % hladiny třetího zásobníku
Prvni_zasobik_A	Word	%IW2	Analogová hodnota 1. zásobníku
Druhy_zasobnik_A	Word	%IW4	Analogová hodnota 2. zásobníku
Treti_zasobik_A	Word	%IW6	Analogová hodnota 3. zásobníku
V_PHV4	Bool	%Q0.3	Ventil pro čerpadlo
V_PHV1	Bool	%Q0.4	Ventil 1. nádrže
V_PHV2	Bool	%Q0.5	Ventil 2. nádrže
V_PHV3	Bool	%Q0.6	Ventil 3. nádrže
Cerpadlo	Bool	%Q0.7	
Nadrz_prvni	Bool	%M5.0	Spustění 1. nádrže
Nadrz_druha	Bool	%M5.1	Spustění 2. nádrže
Nadrz_treti	Bool	%M5.2	Spustění 3. nádrže

Precerpani	Bool	%M5.3	Přečerpání z mixovací nádrže
První_zasobnik_D	Real	%MD10	Hladina 1. zásobníku (0-100%)
Druhy_zasobnik_D	Real	%MD14	Hladina 2. zásobníku (0-100%)
Treti_zasobnik_D	Real	%MD18	Hladina 3. zásobníku (0-100%)
PulsyPrutokomer	DWord	%MD200	Pulsy HWI – OB40
Pozad_Prutok	Real	%MD208	Požadovaný průtok
Prutok	Real	%MD212	Aktuální průtok
Prutok_scaled	Real	%MD216	Aktuální průtok (0-100%)

Tabulka 6.7: Tabulka tagů a symbolů použitých v rámci programu mixovacího pracoviště

6.6.2 Schéma regulace

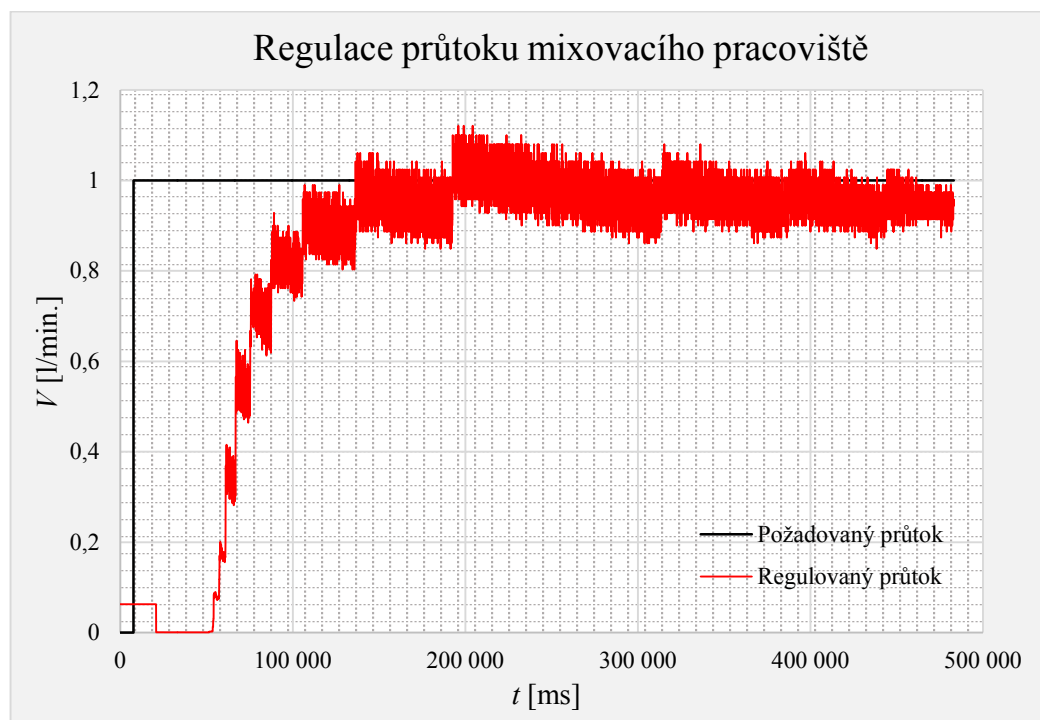
Jak bylo již v kapitolách identifikace mixovacího pracoviště zmíněno, pohled na regulaci mixovacího pracoviště může být na první pohled matoucí, jelikož není úplně zřejmé, kde identifikujeme samotnou soustavu a co je již porucha se kterou se bude muset navržený regulátor vypořádat. Proto byl vytvořen obrázek 6.16, popisující regulační obvod použitý při návrhu regulace na konstantní průtok.



Obrázek 6.16: Schéma regulace mixovacího pracoviště

6.6.3 Měření regulace průtoku

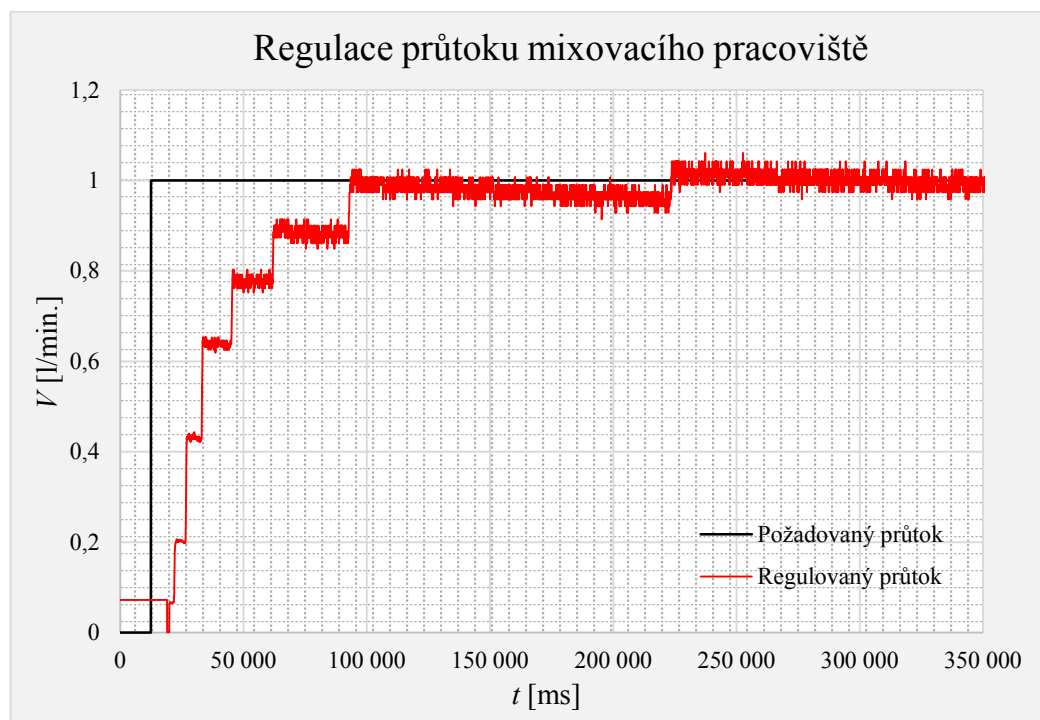
Ačkoli výsledky simulace provedené v Matlabu ukazovaly perfektní regulační děj, při praktickém měření regulace byla zjištěna řada omezení plynoucích z konstrukčního uspořádání modelu. Pokud pak uvážíme tyto omezení, dávají níže uvedená měření smysl. Tato omezení jsou detailněji rozebrána o několik odstavců níže, poté co jsou prezentovány výsledky regulací.



Obrázek 6.17: Regulace průtoku mixovacího pracoviště se zapnutým čerpadlem

Už v kapitolách identifikace bylo vzpomínáno, že pokud bude při procesu regulace mixovacího pracoviště zapnuto čerpadlo, budou fyzikální poměry v potrubí narušeny, což bude mít vliv na výslednou kvalitu regulace. Toto tvrzení dokládá obrázek 6.17, který ukazuje průběh regulace při zapnutém čerpadle. Z tohoto měření je patrné, že při použití čerpadla v průběhu regulace se zhoršuje kvalita měření regulované veličiny a ve výsledku celé regulace.

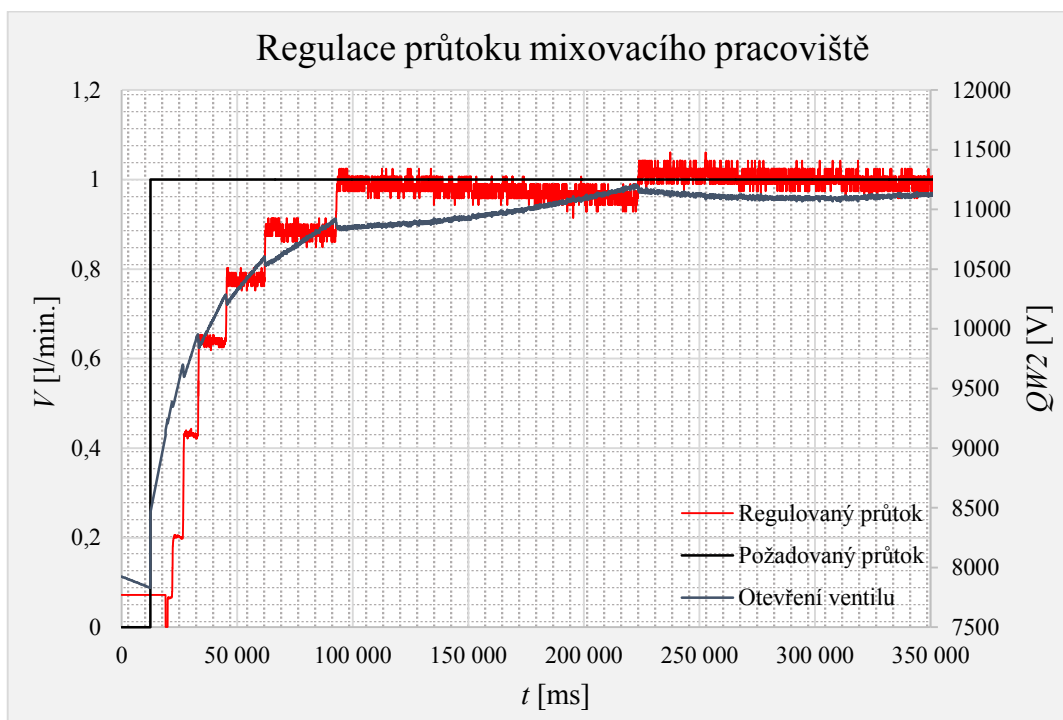
Nejlepší kvality regulace je pak dosaženo při aktivaci odtoku ze všech tří zásobníků. To je znázorněno na obrázku 6.18. Důvodem pak je to, že se hladina mění v čase pomaleji a tedy průtok, který je zaváděn do zpětné vazby nejpomaleji klesá. To způsobuje, že v okolí pracovního bodu se pozorovaný systém delší dobu jeví jako lineární.



Obrázek 6.18: Regulace průtoku mixovacího pracoviště

Nicméně když se podíváme na průběhy regulací tak nemají klasický charakter regulací známých u spojitých lineárních systémů. Důvodem pak jsou omezení, o kterých byla řeč v úvodu této kapitoly. Hlavní omezení regulace pak plyne z nelinearity proporcionálního ventilu, které je navíc podpořeno tím, že ventil reaguje až na určitou hladinu napětí. To značí, že pokud je akční zásah určený regulátorem nižší než určitá hodnota napětí, proporcionální ventil neprovede potřebný zásah. Tímto se vysvětluje proč ustálený průběh regulace (obrázek 6.18), od sté sekundy dále, připomíná spíše dvoustavovou regulaci, než klasickou spojitou regulaci. Když ale vezmeme v potaz, že ventil vnáší do průběhu regulace nelinearitu typu hystereze, je možno toto nepředvídané chování vysvětlit.

Další nejasnost plyne ze „schodovitého“ náběhu regulace (do sté sekundy). Předpoklady identifikace hovořili o klasickém regulačním náběhu opatřeného překmitem. Nicméně pokud opět důkladně analyzujeme vlastnosti ventilu, zjišťujeme čím je to způsobeno. To, že náběh průtoku není plynulý, je zapříčiněno tím, že určitý průtok je konstantní pro určitou množinu napětí. To nás vede opět na myšlenku, že ventil není citlivý na malé změny řídicího signálu. Jinými slovy, ačkoli se ventil otevíral spojitě (obrázek 6.19), průtok vzrostl až poté co byla překročena hladina necitlivosti ventilu.



Obrázek 6.19: Regulace průtoku mixovacího pracoviště včetně otevírání ventilu

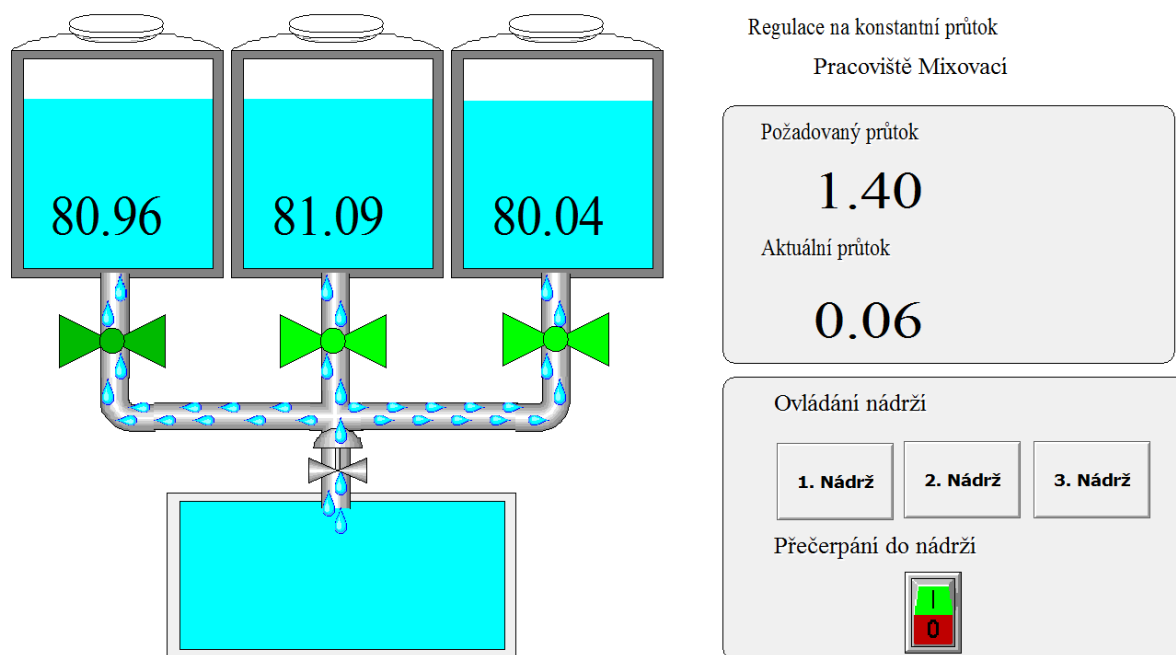
To by vysvětlovalo i to, proč v průběhu identifikace nebylo možné tuto vlastnost zjistit. Za předpokladu, že jsme stanovili přechodovou charakteristiku jako reakci průtoku na maximální otevření proporcionálního ventilu, nebylo možné takovýto průběh sledovat. Jinými slovy, pokud byl v procesu identifikace ventil otevřen z nuly na maximální hodnotu, byl sledovaný průběh průtoku odlišný od průběhu, který vznikne, pokud se ventil otevírá spojitě, jako tomu je v případě celého procesu regulace.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že ačkoli úloha byla navržena jako regulační, konstrukční uspořádání ventilu neumožňuje docílit předpokládaných výsledků.

6.7 Vizualizace mixovacího pracoviště

Vizualizace mixovacího pracoviště sestává se tří částí – samotné okno procesní úlohy, okno přihlášení uživatele a okno trendů. Komunikace je jako v obou předešlých případech realizována pomocí KEPServeruEX.

Výchozí okno procesní úlohy poté podává ucelený pohled na celou soustavu a její prvky v reálném čase. Je zde patrné, jaké ventily jsou otevřeny, které zásobníky jsou aktivní a jsou zde uvedeny informace o hladině všech zásobníků. Dále je zde panel na ovládání nádrží spolu s možností přečerpání zpět do nádrží. Samozřejmě jsou zde i klíčové parametry regulace, kterými jsou požadovaný a aktuální průtok.



Obrázek 6.20: Okno procesní úlohy mixovacího pracoviště

Vizualizace je také opatřena zabezpečením v podobě přihlašování uživatelů a oknem trendů, sloužícím ke sledování regulace v reálném čase. Je zde reálný a historický trend regulace podobně jako tomu bylo u reakčního pracoviště.

7 Závěr

Předmětem této práce bylo analyzovat procesní laboratorní modely s ohledem na jejich možnosti řízení a navrhnout algoritmy pro řízení těchto soustav s ohledem na jejich konstrukční upořádání. S tím souvisí i detailní analýza řízených prvků každé ze soustav.

První analyzovanou soustavou bylo pracoviště reakční. O této úloze je možno hovořit jako o regulační. Je možno identifikovat akční člen působící na soustavu v podobě topného tělesa a zpětnou vazbu zajištěnou teplotními senzory. Při identifikaci reakčního pracoviště bylo zjištěno omezení vlivem bezpečnostního termostatu, který pokud teplota vody v nádrži přesáhne 50°C vypne automaticky topné těleso a znemožní jeho spuštění, dokud teplota neklesne. Toto omezení není možné obejít ani menším příkonem topného tělesa, jak dokumentují změřené přechodové charakteristiky. Soustava byla nakonec identifikována jako integrační soustava s velkými časovými konstantami, přičemž byl navržen PI a P regulátor vhodný pro řízení této soustavy. Z výsledných měření průběhu regulace vyplynulo, že nejlepších výsledků je dosaženo při použití pouze P regulátoru. Samotný algoritmus řízení je realizován pomocí pulzně-šířkové modulace spínání topného tělesa.

Druhou analyzovanou soustavou bylo pracoviště plnicí. V případě této úlohy není možné hovořit o regulaci. Jedná se o sekvenční řízení v otevřené smyčce, tzn. ovládání. V souvislosti s tím ztrácí význam matematický popis a identifikace, jelikož přenos takovéto soustavy je roven jedné. Řídicí software byl proto vytvořen přesně podle funkční analýzy, s tím, že proces plnění nádobek byl zdokumentován měřením.

Třetí analyzovanou soustavou bylo pracoviště mixovací. V případě této úlohy lze hovořit o regulaci. V případě regulace na konstantní průtok lze identifikovat soustavu tvořenou proporcionálním ventilem a potrubím, s tím, že zásobníky jsou vnímány jako porucha přicházející na soustavu. S touto poruchou je regulátor nucen se vyrovnávat se pomocí otevírání a zavírání ventilu. Akčním zásahem je tedy reakce proporcionálního ventilu. Přechodová charakteristika, z níž byl stanoven přenos soustavy, je závislost průtoku na čase v reakci na skokové otevření ventilu. Výsledkem identifikace je přenos prvního řádu opatřený dopravním zpožděním. Navržení regulátoru bylo realizováno pomocí Smithova prediktoru, s tím, že pro vyregulování soustavy je dostačující PI regulátor. Výsledné měření regulace však neodpovídá simulovaným předpokladům. To je způsobeno nelinearitou a necitlivostí proporcionálního ventilu. Pokud uvažíme nelinearitu typu hystereze vztaženou k akčnímu zásahu vyhodnocenému regulátorem, pak je zřejmé, že ačkoli se proporcionální ventil otevíral spojitě, průtok vzrůstal skokově.

Ve světle výše uvedeného je zřejmé, že jediná úloha, u které lze bez větších výhrad hovořit jako o regulační je pracoviště reakční. Ačkoli je možné, z hlediska teorie řízení, zpochybnit identifikaci této soustavy jako integrační, jeví se tato identifikace v praxi jako vyhovující. V případě pracoviště mixovacího lze konstatovat, že úloha může sloužit jako regulační po vhodné hardwarové úpravě. V aktuálním uspořádání, s přihlédnutím na vlastnosti proporcionálního ventilu, není možné realizovat úlohu jako regulační.

Literatura

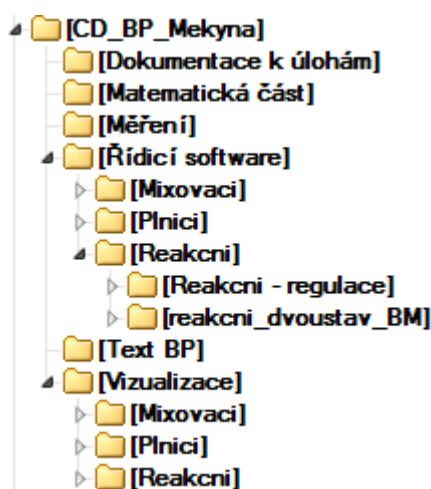
- [1] STROZA. *Profesionální výukový model PRACOVISTĚ REAKČNÍ: Návod k použití*. Rožnov pod Radhoštěm, 15.05.2013.
- [2] STROZA. *Profesionální výukový model PRACOVISTĚ MIXOVACÍ: Návod k použití*. Rožnov pod Radhoštěm, 15.05.2013.
- [3] STROZA. *Profesionální výukový model PRACOVISTĚ PLNICÍ: Návod k použití*. Rožnov pod Radhoštěm, 15.05.2013.
- [4] PÁSEK, Jan. *Programovatelné automaty v řízení technologických procesů*. VUT Brno, 2007, 128 s.
- [5] ZHANK, De-fu, HUANG, Cui-Cui XU a Zhen-juan TANG. *The Principle of PLC and Application in Constrction Materials Industry*. School of Control Science and Engineering: University of Jinan, China, 2009. ISBN 978-952-5726-06-0.
- [6] ŠMEJKAL, Ladislav a Marie MARTINÁSKOVÁ. *PLC a automatizace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 223 s. ISBN 80-860-5658-9.
- [7] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 663 s. ISBN 80-730-0020-2.
- [8] HANUŠ, Bořivoj. *Číslicová regulace technologických procesů: algoritmy, matematicko-fyzikální analýza, identifikace, adaptace*. Brno: VUTUM, 2000, 316 s. ISBN 80-214-1460-X.
- [9] JACK, Hugh. *Automating Manufacturing Systems with PLCs*. Lulu.com, 2010, 644 s. ISBN 978-0557344253.
- [10] BERGER, Hans. *Automating with SIMATIC S7-1500 Configuring, Programming, Motion Control and Security inside TIA Portal*. 1., neue Ausg. Erlangen: PUBLICIS, 2013, 832 s. ISBN 978-389-5784-040.
- [11] SIEMENS. *S7-1500 CPU 1511-1 PN (6ES7511-1AK00-0AB0): Manual*. Germany, 2014.
Dostupné z:
https://cache.automation.siemens.com/dnl_iis/zM/zM4Mjc1OTUA_68020492_HB/s71500_cpu1511_1_pn_manual_en-US_en-US.pdf
- [12] SIEMENS. *S7-1500 Structure and Use of the CPU Memory: Function Manual*. Germany, 2013.
Dostupné z:
https://cache.automation.siemens.com/dnl_iis/jE/jExMzU2NQAA_59193101_HB/s71500_structure_and_use_of_the_PLC_memory_function_manual_en-US_en-US.pdf
- [13] BERGER, Hans. *Automating with STEP 7 in LAD and FBD: SIMATIC S7-300/400 programmable controllers*. 4th rev. and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008, 440 s. ISBN 978-3-89578-297-8.
- [14] BERGER, Hans. *Automating with STEP 7 in STL and SCL: programmable controllers SIMATIC S7-300/400*. 4th rev. ed. Erlangen: Publicis Corporate Pub., 2007, 527 s. ISBN 978-389-5782-954.
- [15] STROZA. *Profesionální výukový model PRACOVISTĚ REAKČNÍ: Popis svorkovnice*. Rožnov pod Radhoštěm, 15.05.2013.
- [16] STROZA. *Profesionální výukový model PRACOVISTĚ MIXOVACÍ: Popis svorkovnice*. Rožnov pod Radhoštěm, 15.05.2013.

- [17] STROZA. *Profesionální výukový model PRACOVÍŠTĚ PLNICÍ: Popis svorkovnice*. Rožnov pod Radhoštěm, 15.05.2013.
- [18] SIEMENS. *S7-1500 ANALOG INPUT MODULE AI 8XU/I/RTD/TC ST (6ES7531-7KF00-0AB0): Manual*. Germany, 2014.
Dostupné z:
https://cache.automation.siemens.com/dnl_iis/zQ/zQ4NDk1AAAA_59193205_HB/s71500_ai_8xu_i_rtd_tc_st_manual_en-US_en-US.pdf
- [19] BERGER, Hans. *Automating with SIMATIC*. 5th edition. Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2013, 284 p. ISBN 978-3895783876.
- [20] SIEMENS. *SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID Control: Manual*. Germany, 2014.
Dostupné z:
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_74025/v1/s71500_pid_control_function_manual_enUS_en-US.pdf

Seznam příloh

Příloha I: Adresářová struktura přiloženého CD

Struktura přiloženého CD:



Matematická část – obsahuje kódy v Matlabu pro návrh regulátoru reakčního a mixovacího pracoviště + model v Simulinku pro soustavu se Smithovým prediktorem.

Měření – obsahuje exportována měření všech pracovišť. Identifikace + regulace reakčního pracoviště, identifikace + regulace mixovacího pracoviště a průběh plnění nádobek plnicího pracoviště.

Řídicí software – obsahuje všechny programy tvořené v TIA Portal V12. Jsou zde dva programy pro reakční pracoviště, jeden z automatickým spínáním mixéru v závislosti na teplotní diferenci, druhý pak se zapnutým mixérem v průběhu celého procesu regulace.

Vizualizace – obsahuje všechny vizualizační programy tvořené ve Wonderware InTouch. V každé složce je soubor KEPserveruEX zajišťující komunikaci.

Text BP – textová část bakalářské práce ve formátu .doc a .pdf